

Digitalisierungspotenziale der Dokumentation im Tunnelbau

Prozessevaluierung ausgewählter Baustellen

Felix Ehmke, BSc

Innsbruck, März 2024

Masterarbeit

eingereicht an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für Technische
Wissenschaften zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Diese Masterarbeit ist der Vertiefungsrichtung „Baustoffe, Baubetrieb und
Projektmanagement“ des Masterstudiums Bauingenieurwissenschaften zugeordnet.

Beurteiler:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthias Flora,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Betreuer: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthias Flora, Universität
Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften,
Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Mitbetreuerin: Dipl.-Ing. Hannah Salzgeber, Universität Innsbruck, Institut für
Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich
Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Danke!

Lieber Herr Flora, Ihnen gilt mein besonderer Dank! Ihre Expertise und Begeisterung für den Tunnelbau faszinieren mich. Die Idee und Ihre Kontakte zu den Tunnelbaustellen in Europa, die die Besuche und damit die Masterarbeit erst ermöglicht haben, weiß ich sehr zu schätzen! Liebe Hannah, lieber Hans, lieber Werner, euch dreien danke ich sehr für die hilfreichen Ratschläge und die konstruktiven Gespräche. Die Zusammenarbeit hat mir viel Freude bereitet.

Zudem möchte ich mich bei meinen motivierten Interviewpartnern bedanken. Ihr habt mir mit der Möglichkeit, eure Baustellen besuchen zu dürfen, nicht nur sehr bei meiner Masterarbeit geholfen, sondern auch meine Begeisterung für Tunnel und mein Wissen enorm gesteigert.

Liebe Mama, lieber Papa, danke für die ununterbrochene Unterstützung! Ohne euch hätte ich dieses Studium erst gar nicht anfangen können.

Liebe Sina, auch dir bin ich unglaublich dankbar. Mit dir an meiner Seite wurde der Umzug nach Innsbruck, um hier leben und studieren zu können, erst möglich. In Höhen und Tiefen bist du immer da für mich. Danke!

Zu guter Letzt geht ein großes ‚Danke schön‘ raus an dich Philipp, fürs Korrektur lesen, und an all meine Kommilitonen, die meine Studienzeit unvergesslich gemacht haben!

Kurzfassung

Mit der fortschreitenden Digitalisierung wird die Umstellung auf eine computergestützte baubegleitende Dokumentation im Tunnelbau unverzichtbar. Durch nicht durchgängige digitale Prozesse, schlecht leserliche Handschriften, Übertragungsfehler, Sprachbarrieren und Verluste wichtiger Dokumente sowie erschwerte Vergleichbarkeit durch Subjektivität besteht die Gefahr, dass Informationen unvollständig sind, missinterpretiert werden oder verloren gehen. In der Folge ist eine lückenlose Zusammenstellung und Archivierung der Baudokumentation schwierig und kostet viel Zeit und Geld. Zudem können Qualität und Nachhaltigkeit des Baugewerkes leiden, wenn Unterlagen für das spätere Betreiben und Warten mangelhaft sind. Auf Tunnelbaustellen kommen bereits verschiedene Softwarevarianten zum Einsatz. Einige Programme und Applikationen bieten die Möglichkeit direkt auf der Tunnelbohrmaschine mit Tablets oder Smartphones digital zu kommunizieren und zu dokumentieren.

In dieser Masterarbeit werden drei laufende Tunnelbauprojekte untersucht, um einen Überblick über die IST-Stände der Baustellendokumentation zu bekommen. Insbesondere werden folgende Fragestellungen betrachtet. Wie viele Dokumente werden mehrfach geführt, wie viel wird noch auf Papier geschrieben? Wo sind hinsichtlich der Dokumentation die Unterschiede zwischen konventionell ausgeführten und maschinellen Vortrieben? Ist eine digitale Transformation hin zu einem ‚Tunnel Information Model‘ möglich und umsetzbar?

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Empfehlung abgegeben, welcher Dokumentationsprozess sich als besonders nutzerfreundlich, effizient und wirtschaftlich erweist. Ob firmeninterne, selbst entwickelte Lösungen auf die Dauer mit global verfügbarer Software konkurrenzfähig sind, wird ebenfalls überprüft. Weiterhin wird untersucht, welche zusätzlichen Vorteile sich ergeben, wenn die komplette Dokumentation digital geführt wird. Inwiefern die ausführenden Firmen die digitalen Informationen der Baustelle in eine Datenbank überführen und das zentrale Modell damit verknüpfen, soll Bestandteil der Nachforschung sein. Darin sollen Daten abgespeichert und synchronisiert werden, so dass eine Verfolgung des Baufortschritts unter Tage oberirdisch möglich ist.

Eine strukturierte, transparente Dokumentation und Kommunikation kann auch das oft herausfordernde Verhältnis zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer sowie die Zusammenarbeit mit Nachunternehmern verbessern. Schlussendlich werden in dieser Arbeit auch die Potenziale der Digitalisierung auf den partnerschaftlichen Umgang der Vertragsparteien betrachtet. Insgesamt soll ein Beitrag für eine weniger fehleranfällige und wirtschaftlichere Zukunft im Tunnelbau geleistet werden.

Abstract

As digitization progresses, the switch to computer-aided documentation during tunnel construction is becoming indispensable. Due to inconsistent digital processes, poorly legible handwriting, transmission errors, language barriers and loss of important documents, as well as difficult comparability due to subjectivity, there is a risk that information will be incomplete, misinterpreted or lost. As a result, it is difficult to compile and archive construction documentation without gaps and this costs a lot of time and money. In addition, the quality and sustainability of the construction work can suffer if documents for subsequent operation and maintenance are inadequate. Various types of software are already in use on tunnel construction sites. Some programs and applications offer the option of communicating and documenting digitally directly on the tunnel boring machine using tablets or smartphones.

This master's thesis examines three ongoing tunnel construction projects in order to gain an overview of the current status of construction site documentation. In particular, the following questions are considered. How many documents are kept 'multiple times', how much is still written on paper? What are the differences in documentation between conventionally executed and mechanized tunneling? Is a digital transformation to a 'Tunnel Information Model' possible and feasible?

Based on the findings, a recommendation is made as to which documentation process proves to be particularly user-friendly, efficient and economical. Whether in-house, self-developed solutions are competitive with globally available software in the long term is also examined. Furthermore, the additional advantages of keeping all documentation digitally will be examined. The extent to which the contractors transfer the digital information from the construction site to a database and link it to the central model will be part of the research. Data is to be stored and synchronized in this database so that it is possible to track construction progress above ground.

Structured, transparent documentation and communication can also improve the often-challenging relationship between client and contractor as well as cooperation with subcontractors. Finally, this paper also looks at the potential of digitization on the partnership between the contracting parties. This work is supposed to contribute to a less error-prone and more economical future in tunneling.

Inhaltsverzeichnis

Danke!	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Motivation	2
1.3 Zielsetzung	2
1.4 Methodik.....	3
2 Grundlagen	5
2.1 Digitalisierung	5
2.1.1 Digitalisierung im Bauwesen	6
2.1.2 Digitalisierung im Tunnelbau.....	7
2.2 Building Information Modeling	8
2.3 Tunnel Information Modeling	10
2.4 Dokumentation auf der Baustelle	12
2.4.1 Normative Grundlagen	13
2.4.2 Zweck der Dokumentation	14
2.5 Dokumentation im Tunnelbau	17
2.5.1 Überblick der Vortriebsmethoden	17
2.5.2 Normative Grundlagen zur Dokumentation im Tunnel.....	19
2.5.3 Stand der Technik.....	20
2.5.3.1 Zyklischer Vortrieb.....	20
2.5.3.2 Kontinuierlicher Vortrieb	23

3	Baustellenanalyse	27
3.1	Baustelle A	28
3.1.1	Allgemeiner Überblick	28
3.1.1.1	Baustellenstruktur	29
3.1.1.2	Zuständigkeiten & Aufgabenteilung	29
3.1.2	Digitalisierung	30
3.1.2.1	Was wird dokumentiert?	30
3.1.2.2	Kommunikation	33
3.1.2.3	Automatisierung / Robotik	33
3.1.3	Softwarelösung	33
3.1.3.1	Software	33
3.1.3.2	Bereitschaft der MitarbeiterInnen	35
3.1.3.3	Cybersicherheit	35
3.1.4	Auswertung	35
3.2	Baustelle B	36
3.2.1	Allgemeiner Überblick	36
3.2.1.1	Baustellenstruktur	36
3.2.1.2	Zuständigkeiten & Aufgabenteilung	37
3.2.2	Digitalisierung	37
3.2.2.1	Was wird dokumentiert?	38
3.2.2.2	Kommunikation	42
3.2.2.3	Automatisierung / Robotik	42
3.2.3	Softwarelösung	42
3.2.3.1	Software	42
3.2.3.2	Bereitschaft der MitarbeiterInnen	42
3.2.3.3	Cybersicherheit	43
3.2.4	Auswertung	43
3.3	Baustelle C	43
3.3.1	Allgemeiner Überblick	43
3.3.1.1	Baustellenstruktur	44
3.3.1.2	Zuständigkeiten & Aufgabenteilung	44
3.3.2	Digitalisierung	45
3.3.2.1	Was wird dokumentiert?	45
3.3.2.2	Kommunikation	52
3.3.2.3	Automatisierung / Robotik	52
3.3.3	Softwarelösung	52
3.3.3.1	Software	52
3.3.3.2	Bereitschaft der MitarbeiterInnen	53
3.3.3.3	Cybersicherheit	53
3.3.4	Auswertung	53
3.4	Unterschiede / Besonderheiten der Vortriebsarten	54

3.5	Vergleich der Baustellen	56
4	Interviews	59
4.1	Stand der Forschung zur Durchführung von Interviews	59
4.2	Transkription der Interviews	60
4.3	Qualitative Inhaltsanalyse.....	60
4.4	Gütekriterien.....	62
4.5	Auswahl der Interviewpartner	63
4.6	Vorbereitung der Interviews.....	63
4.7	Durchführung der Interviews	63
4.8	Ergebnisse der Interviews.....	64
4.8.1	Codewolke.....	64
4.8.2	Beschreibung der Kategorien	65
4.8.3	Häufigkeitstabelle.....	69
4.8.4	Ähnlichkeitsmatrix	70
4.8.5	Diagramme zu den Kategorien.....	71
4.8.6	Dokument-Portraits	76
4.9	Interpretation	77
5	Zusammenfassung und Ausblick	79
5.1	Beantwortung der Forschungsfragen.....	79
5.2	Ausblick und Forschungsbedarf	82
6	Literatur	85
7	Anhang.....	89
7.1	Standardisierter Bewertungsbogen für Baustellenbesuche.....	89
7.2	Standardisierter Interview-Leitfaden des Bauleiters	90
7.3	Standardisierter Interview-Leitfaden des Poliers	91
7.4	Einverständniserklärung	92
7.5	Freigabebestätigung.....	93
	Verpflichtungs- und Einverständniserklärung.....	94

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Informationsverlust zwischen Projektphasen [10, S. 3].....	9
Abbildung 2-2: Die Phasen eines Modells bei der konsistenten Anwendung [9, S. 5].....	11
Abbildung 2-3: Baufortschrittskontrolle durch Verknüpfung mit Terminplan [18, S. 681]	12
Abbildung 2-4: Anforderungen an die Dokumentation mit gemeinsamen Zielen [28, S. 679]	15
Abbildung 2-5: Dokumentationsmittel mit zeitlicher Zuordnung [28, S. 688].....	16
Abbildung 2-6: Markierung der Zeitintervalle am Tablet oder Smartphone [38, S. 82].....	21
Abbildung 2-7: Digitale Möglichkeiten der Zeiteingabe von Aktivitäten [39, S. 19].....	22
Abbildung 2-8: Dokumentationsprozess bei digitaler Arbeitsweise [38, S. 88]	23
Abbildung 3-1: Bewertungsbogen als Flussdiagramm.....	28
Abbildung 3-2: Bohrwagen im Einsatz	29
Abbildung 3-3: Zyklusdiagramm 1/2	31
Abbildung 3-4: Zyklusdiagramm 2/2	32
Abbildung 3-5: Graphische Darstellung der Verschiebungskomponenten	32
Abbildung 3-6: Ausschnitt des Bautagesberichts	34
Abbildung 3-7: Protokoll zu den Probebohrungen.....	38
Abbildung 3-8: Maschinendaten	39
Abbildung 3-9: Zyklusdiagramm	39
Abbildung 3-10: Protokoll über Abstandsmessung zwischen Ring und Schild.....	40
Abbildung 3-11: Protokoll über Hinterfüllung mit Kies bzw. Mörtel.....	41
Abbildung 3-12: Wartungsprotokoll	41
Abbildung 3-13: Zyklusdiagramme (analog vs. digital)	45
Abbildung 3-14: Digitales vs. analoges Ringbauprotokoll	46
Abbildung 3-15: Sehnenlängenmessungsprotokoll.....	47
Abbildung 3-16: Abstichmaßprotokoll.....	48
Abbildung 3-17: Feldaufmaßblatt	49
Abbildung 3-18: Bautagesbericht.....	50
Abbildung 3-19: Schadstellen- (li.) sowie Spalt- und Versatzmaßprotokoll (re.).....	51
Abbildung 3-20: Ortsbrustaufnahme (li.) und baugeologisches Protokoll (re.).....	51
Abbildung 3-21: Schichtdiagramm des Bauleiters	53
Abbildung 4-1: Ablaufschema nach Kuckartz [45, S. 100]	61
Abbildung 4-2: Codewolke (Kategorien nach Häufigkeit)	65
Abbildung 4-3: Ähnlichkeitskoeffizienten und ihre Berechnung [46, S. 198].....	70

Abbildung 4-4: Codehäufigkeit zu ‚Angaben zur Person‘	72
Abbildung 4-5: Codehäufigkeit zu ‚Digitalisierung allgemein‘	73
Abbildung 4-6: Codehäufigkeit zu ‚Aktueller IST-Zustand Tunnelbau‘	73
Abbildung 4-7: Codehäufigkeit zu ‚Software‘	74
Abbildung 4-8: Codehäufigkeit zu ‚Entwicklung im eigenen Unternehmen‘	75
Abbildung 4-9: Codehäufigkeit zu ‚Verhältnis zum Auftraggeber‘	75
Abbildung 4-10: Codehäufigkeit zu ‚Zukunftsvorstellung‘	76
Abbildung 4-11: Dokumentenportraits	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Zuständigkeiten bei Baustelle A	30
Tabelle 3-2: Zuständigkeiten bei Baustelle B.....	37
Tabelle 3-3: Zuständigkeiten bei Baustelle C.....	45
Tabelle 3-4: Unterschiede / Besonderheiten.....	55
Tabelle 4-1: Aufteilung des Interviews	63
Tabelle 4-2: Interview-Daten	64
Tabelle 4-3: Beschreibung und Anwendung der Kategorien inklusive eines Beispiels.....	69
Tabelle 4-4: Häufigkeiten der Codes in den Interviews	70
Tabelle 4-5: Ähnlichkeitsmatrix	71
Tabelle 5-1: Zusammenfassung der geführten Dokumente.....	80

Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
6D	Sechsdimensional
Abb.	Abbildung
AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
ARGE	Arbeitsgemeinschaft
BIM	Building Information Modeling
BL	Bauleiter
bSI	buildingSMART International e. V.
CDE	Common Data Environment
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V.
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
Et al.	Et aliae (Femininum) oder et alii (Maskulinum) für ‚und andere‘
EU	Europäische Union
Evtl.	Eventuell
GAT2	Gesprächsanalytisches Transkriptionssystem 2
Ggf.	Gegebenenfalls
IAI	Internationale Allianz für Interoperabilität
ID	Identifikation
ISO	International Organisation for Standardization
K	Kies
Li.	Links
M	Mörtel
OEBB	Österreichische Bundesbahn
P	Polier
Re.	Rechts
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SSOT	Single Source of Truth
Tab.	Tabelle
TBM	Tunnelbohrmaschine
TIM	Tunnel Information Modeling
TIMS	Tunnel Information Management System
VK	Verklaust
VOB/A	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, Teil A
VOB/B	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, Teil B
ZVB	Zusätzliche Vertragsbedingungen

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Digitalisierung ist in vollem Gange und verändert das Leben, die Gesellschaft und die Arbeitswelt. Die Bauindustrie zeigt bislang eine zurückhaltende Reaktion auf diese Entwicklung und hinkt im Vergleich zu anderen Branchen hinterher. Für einen direkten Vergleich hat die Deutsche Telekom AG in Zusammenarbeit mit der techconsult GmbH den Digitalisierungsindex für den Mittelstand entwickelt, bei dem vier Handlungsfelder in die Bewertung einfließen:

1. Die Beziehung zu KundInnen.
2. Die Produktivität.
3. Die digitalen Geschäftsmodelle.
4. Die IT-Sicherheit und der Datenschutz.

Im Jahr 2022 ist die Baubranche in Deutschland mit nur 53 von 100 möglichen Punkten weit hinter dem Durchschnitt (59 Punkte) gelandet. [1, S. 2]

Als Gründe für das schlechte Abschneiden werden vor allem der fehlende internationale Wettbewerb, die Unikatfokussierung, die hohe Arbeitsteilung im Wertschöpfungsprozess sowie die zu gering angesetzten allgemeinen Geschäftskosten genannt. Aufgrund der weiterhin vollen Auftragsbücher wird bei den Bauunternehmen kein Grund für eine Veränderung gesehen. In der Folge fehlt das Engagement, um in eine ‚digitalere‘ Zukunft zu investieren. [2, S. 48]

Mit der fortschreitenden Digitalisierung wird die Umstellung auf eine computergestützte baubegleitende Dokumentation im Tunnelbau unverzichtbar. Durch nicht durchgängige digitale Prozesse, schlecht leserliche Handschriften, Übertragungsfehler, Sprachbarrieren und Verluste wichtiger Dokumente sowie erschwerte Vergleichbarkeit durch Subjektivität besteht die Gefahr, dass Informationen unvollständig sind, missinterpretiert werden oder verloren gehen. In der Folge ist eine lückenlose Zusammenstellung und Archivierung der Baudokumentation schwierig und kostet viel Zeit und Geld. Zudem können Qualität und Nachhaltigkeit des Baugewerkes leiden, wenn Unterlagen für das spätere Betreiben und Warten mangelhaft sind. Auf Tunnelbaustellen kommen bereits verschiedene Softwarevarianten zum Einsatz. Einige Programme und Applikationen bieten die Möglichkeit direkt auf der Tunnelbohrmaschine mit Tablets oder Smartphones digital zu kommunizieren und zu dokumentieren. Es mangelt nicht an der Software, sondern an der Beschaffung und dem Einsatz. Es sind sowohl globale als auch

firmeninterne, selbst entwickelte Lösungen vorhanden. Am Arbeitsbereich für Baubetrieb und Tunnelbau der Universität Innsbruck wird aktiv an Tunnel Information Modeling (TIM) und der erfolgreichen Umsetzung in der Praxis geforscht. Mit diesem digitalen Werkzeug sollen Planung, Ausführung und Betrieb eines Tunnels über ein zentrales Modell gesteuert werden.

1.2 Motivation

Um weiterhin wirtschaftlich konkurrenzfähig zu bleiben und die Digitalisierung aktiv mitzugestalten, bedarf es weiterer Forschung und Innovation in der gesamten Baubranche. Mit dieser Arbeit sollen Erkenntnisse gewonnen werden, wie ‚digital‘ der Tunnelbau ist.

Gemäß Digitalisierungsbericht nutzen 31 % der Bauunternehmen in Deutschland bereits ein digitales Bautagebuch, weitere 28 % wollen es einführen. 21 % der befragten Betriebe visualisieren ihre Projekte in 3D und weitere 22 % Prozent beabsichtigen einzusteigen.

Die Motivation dieser Arbeit ist also klar definiert: Wieso sind nur so wenige Bauunternehmen im deutschsprachigen Raum an der digitalen Zukunft interessiert? Wie schaut der europaweite Vergleich aus? Und wie können am Bau Beteiligte überzeugt werden, die Wirtschaftlichkeit mit TIM zu verbessern und die Zukunft nachhaltig zu gestalten?

1.3 Zielsetzung

In dieser Masterarbeit werden drei laufende Tunnelbauprojekte im Hinblick auf die Informationserfassung untersucht, um einen Überblick über die IST-Zustände der Baustellendokumentation zu bekommen. Insbesondere werden folgende Fragestellungen betrachtet. Wie viele Informationen werden mehrfach erfasst und wie viele Dokumente mehrfach geführt, wie viel wird noch auf Papier geschrieben? Wo sind hinsichtlich der Dokumentation die Unterschiede zwischen konventionell ausgeführten und maschinellen Vortrieben? Ist eine digitale Transformation hin zu einem ‚Tunnel Information Model‘ möglich und umsetzbar?

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Empfehlung abgegeben, welcher Dokumentationsprozess sich als besonders nutzerfreundlich, effizient und wirtschaftlich erweist. Ob firmeninterne, selbst entwickelte Lösungen auf die Dauer mit global verfügbarer Software konkurrenzfähig sind, wird ebenfalls überprüft. Weiterhin wird untersucht, welche zusätzlichen Vorteile sich ergeben, wenn die komplette Dokumentation digital geführt wird. Inwiefern die ausführenden Firmen die digitalen Informationen der Baustelle in eine Datenbank überführen und das zentrale Modell damit verknüpfen, soll Bestandteil der Nachforschung sein. Darin sollen Daten abgespeichert und synchronisiert werden, so dass eine Verfolgung des Baufortschritts unter Tage oberirdisch möglich ist.

Eine strukturierte, transparente Dokumentation und Kommunikation kann auch das oft herausfordernde Verhältnis zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer sowie die

Zusammenarbeit mit Nachunternehmen verbessern. Schlussendlich werden in dieser Arbeit auch die Potenziale der Digitalisierung auf den partnerschaftlichen Umgang der Vertragsparteien betrachtet. Insgesamt soll ein Beitrag für eine weniger fehleranfällige und wirtschaftlichere Zukunft im Tunnelbau geleistet werden.

1.4 Methodik

Zu Beginn dieser Arbeit wird eine Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der Forschung darzustellen. Der Fokus liegt hierbei auf der Definition der Begriffe Digitalisierung, BIM und TIM sowie der Baustellendokumentation. Der Zweck der Dokumentation sowie aktuelle Normen werden zusammengefasst und vorgestellt. Die beiden unterschiedlichen Vortriebsarten, konventioneller und maschineller Tunnelbau, werden vorab in Hinblick auf den Stand der Technik verglichen.

Nach der Ermittlung des Forschungsbedarfs werden drei Tunnelbaustellen beschrieben, die Hauptgegenstand dieser Masterarbeit sind. Mithilfe eines standardisierten Bewertungsbogens soll ein objektiver Überblick über die Baustellen erlangt werden. Insofern eine digitale Softwarelösung vorhanden ist, soll diese begutachtet und beurteilt werden. In einem nächsten Schritt erfolgt die Auswertung der Ergebnisse. Anschließend sollen Besonderheiten und Unterschiede der verschiedenen Vortriebsmethoden sowie der analysierten Baustellen dargestellt werden.

Zusätzlich sollen über Interviews mit den für die Dokumentation verantwortlichen Personen, BauleiterInnen und Polieren¹, Erkenntnisse über den derzeitigen IST-Zustand in der Praxis gewonnen werden. Hierfür ist ein leitfadengestützter Interview-Fragebogen vorgesehen. Die Interviews werden mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet.

Die Arbeit schließt mit der Beantwortung der Forschungsfragen und einem Ausblick ab. Es sollen damit Anreize für weitergehende Forschungstätigkeiten im Bereich der Digitalisierung gegeben werden.

¹ In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird auf eine geschlechtsspezifische Sprache verzichtet, wenn ausschließlich männliche Personen angesprochen sind. Bestimmte Berufsfelder im Bereich des Tunnelbaus sind stark von männlichen Arbeitskräften geprägt. Bis zum aktuellen Zeitpunkt sind auf den während dieser Arbeit untersuchten Baustellen keine Frauen als Polier oder Mineur tätig.

2 Grundlagen

Im ersten Schritt werden die Grundlagen ermittelt. Nach den Begriffsdefinitionen erfolgt die Erklärung von BIM und TIM. Die Baustellendokumentation im Allgemeinen sowie dessen Zweck wird präsentiert, zudem erfolgt eine normative Einordnung. Der Stand der Technik sowohl im konventionellen als auch im maschinellen Tunnelbau in Bezug auf die Digitalisierung und die Vorstellung der gängigen Softwareprogramme schließen das Kapitel ab.

2.1 Digitalisierung

Der Begriff ‚Digitalisierung‘ ist sehr vielschichtig und deshalb nicht einheitlich definiert. Im ursprünglichen Sinne steht er für die Umwandlung von analogen Informationen in digitale Daten und beschreibt den elektronischen Prozess der Informationsaufnahme, -übermittlung und -weiterverarbeitung mittels Computer, Software und Internet. [3]

Nach Bendel steht die Digitalisierung vor allem für die digitale Revolution, auch ‚Computerisierung‘ genannt, die immer mehr an Bedeutung gewinnt. Sie wird als dritte Revolution nach der neolithischen Revolution in der Jungsteinzeit ca. 15.000 vor Christus sowie der industriellen Revolution im 19. Jahrhundert bezeichnet. Nachdem gegen Ende des 20. Jahrhunderts die Entwicklung der Informationstechnologie (IT) für positive Veränderungen in der Arbeitswelt und den Haushalten gesorgt hat, übernehmen derzeit innovative Geschäftsmodelle und disruptive Technologien den Markt. Die Virtualität kommt in allen Bereichen der Gesellschaft und der Arbeitswelt immer näher an die Realität heran. Als Nachfolger der digitalen Revolution wird die ‚Industrie 4.0‘ bereits als vierte Revolution genannt. [4]

Die Digitalisierung wirkt sich auch im Bauwesen auf alle Unternehmensbereiche aus. Nicht nur die Bauwerke und Dienstleistungen, sondern auch die Arbeits-, Produktions- und Kommunikationsprozesse werden maßgeblich beeinflusst. Die folgenden Vorteile gehen mit einer Anwendung von digitalen Methoden einher:

- Verbesserung der Dokumentationsgenauigkeit
- Verbesserung der Produktivität
- Verbesserung der Qualität
- Verbesserung der Arbeitssicherheit

- Reduktion der Kosten
- Erhöhte Zufriedenheit der handelnden Menschen und NutzerInnen der Bauwerke. [5, S. 41]

2.1.1 Digitalisierung im Bauwesen

„Der durchgängige Einsatz von digitalen Technologien kann Prozessabläufe transparenter gestalten, indem Schnittstellen reduziert und die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten optimiert wird.“ [6, S. 18]

Die derzeitige Praxis sieht meist so aus, dass Daten analog erfasst und in der Folge später vom Baustellenpersonal nachbearbeitet werden müssen, da sie nicht von vornherein in der gewünschten Form zur Verfügung stehen. Diese Schnittstelle ist eine Fehlerquelle und somit als problematisch einzustufen. Nicht nur weil Fehler beim Übertragen der Informationen auftreten, sondern auch weil Dokumente komplett verloren gehen können. Der Dokumentationsprozess beginnt auf der Baustelle. Somit muss besonders das erste Glied in der Dokumentationskette davon überzeugt werden, digitale Angebote zu nutzen. Rein technisch ist bereits einiges möglich – im Mittelpunkt muss aber der Mensch stehen. Die Baubranche ist derzeit noch weit vom Construction 4.0, dem Pendant zur Industrie 4.0, entfernt. Mit Virtual Reality in der Planungsphase, BIM-Methoden (vergleiche Kapitel 2.2), der Automatisierung von Bauablaufplanungen über Aufwandswerte für Bauteile und intuitiv einsetzbaren Endgeräten auf den Baustellen wird versucht, die Prozesse zu optimieren. [2, S. 52]

Auch wenn es noch an standardisierten, einheitlichen, open-data Formaten für BIM-Anwendungen fehlt, ist die Digitalisierung in der Planungsphase im Vergleich zur Ausführungsphase meist sehr weit entwickelt. IFC-Formate erlauben es unterschiedlichen PlanerInnen in verschiedenen Softwarelösungen gemeinsam an einem Projekt zu arbeiten. Auf der Baustelle folgt ein technologischer Generationenkonflikt. Tendenziell stehen vor allem ältere Personen einem technologischen Fortschritt häufig kritisch gegenüber und gehen voreingenommen in Trainings für neue digitale Möglichkeiten. Die Möglichkeiten, digitale Datenmodelle aus der Planungsphase auf der Baustelle zu nutzen, werden noch nicht ausgereizt. [7, S. 287]

Die Baubranche ist im Vergleich zu anderen Branchen sehr anfällig für ungeplante Ereignisse. Da in solchen Fällen oft Bauverzögerungen mit erheblichen Mehrkosten folgen, ist es wichtig, schnell zu handeln und Gegenmaßnahmen einzuleiten. Damit das möglich ist, sind die Kenntnisse über den Ist-Zustand eine unabdingbare Voraussetzung. Mit einer papierbasierten Dokumentation ist ein Abgleich zwischen SOLL- und IST-Zustand nicht kurzfristig möglich. Wenn Daten im Nachhinein digitalisiert werden, sind die Bauarbeiten fortgeschritten und der

Stand der übertragenen Informationen veraltet. Eine zeitgerechte Kontrolle wird unter diesen Bedingungen schwierig und eine proaktive Steuerung erst recht. Die Daten sollen, auch für die Abrechnung und die darauffolgenden Arbeitsschritte, in Echtzeit an ein zentrales System weitergeleitet und dort strukturiert abgelegt werden. Zum Beispiel mithilfe einer standardisierten Einteilung der bauspezifischen Zustände wie ‚Planung abgeschlossen‘, ‚geliefert‘ oder ‚im Bau‘ kann jedes Bauteil mit Informationen über den aktuellen Zustand versehen werden. Über eine rechtegesteuerte Überführung der Daten kann die für die Aufgabe verantwortliche Person den Status wechseln. Zusätzlich sollte es möglich sein, Bemerkungen zu den Bauteilen hinzuzufügen. So kann bei einer späteren Suche besser gefiltert werden. Es bietet sich an, Bauteile von vornherein beispielsweise mit QR- oder Barcodes auszustatten oder anderweitig zu kennzeichnen, damit eine schnelle Erfassung möglich ist. [5, S. 145-157]

Ein weiterer Grund für die stockende Entwicklung im Bausektor ist die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) der Europäischen Union. Die im Mai 2018 in Kraft getretene Verordnung sorgt für eine bremsende Wirkung im Bereich Digitalisierung. Bei einer Befragung durch die ABAS Software GmbH sieht jedes zweite Unternehmen die rechtlichen Unsicherheiten als problematisch. 60 % machen sich Sorgen um die IT-Sicherheit. [8]

Um Informationsverluste zu vermeiden, die Übersicht über die Daten zu erhalten und für eine bessere Kooperation der KollegInnen zu sorgen, sind zum Beispiel Apps oder webbasierte Onlineprogramme auf mobilen Endgeräten eine Lösungsmöglichkeit. 22% der von der Telekom befragten Unternehmen möchten deshalb weiter in das Endgerätemanagement investieren. 93% werden die Investitionen allgemein beibehalten oder erhöhen. [1, S. 3]

2.1.2 Digitalisierung im Tunnelbau

Bei einer erfolgreichen Umsetzung der Digitalisierung im Tunnelbau sieht der Deutsche Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (kurz DAUB) einige Chancen. Der Arbeitskreis ‚BIM im Untertagebau‘ der DAUB prognostiziert, „*dass die Untertagebauprojekte künftig*

- *in noch besserer Planungsqualität*
- *bei gesteigerter Akzeptanz bei den Projektstakeholdern*
- *mit einer höheren Termin- und Kostensicherheit*
- *für alle Projektbeteiligten effizienter und konfliktärmer*
- *für den Betreiber mit einer zentralen und transparenten Dokumentation*

realisiert werden können.“ [9, S. 5]

Derzeit ist kein Softwareprogramm auf dem Markt vorhanden, welches den gesamten Tunnel von der Planung bis zum Betrieb als durchgängigen Prozess abbilden kann. Im Tunnelbau gibt es eher wenige, dafür meist große Baumaßnahmen. Die geringere Nachfrage durch die wenigen

Nutzer sorgt schließlich dafür, dass es keine großen globalen Lösungen gibt, die ständig aufgrund vermehrter Daten verbessert werden und sich gut vermarkten lassen. Die Infrastrukturfirmer sind auf sich selbst gestellt und arbeiten häufig an internen Lösungen, sofern überhaupt Interesse am Thema Digitalisierung besteht. [7, S. 285]

„Die Qualität unseres Denkens und Handelns zeichnet sich anhand dessen aus, was wir verstehen.“ [5, S. 4] Das Zitat von Hofstadler spiegelt die Bedeutung des Verstehens ablaufender Prozesse auf Tunnelbaustellen wider. Die geologischen Unsicherheiten und Risiken sowie die Schwierigkeit der Lokalisierung stellen extreme Herausforderungen dar. Es braucht Frühwarnsysteme sowie digitalisierte Prozesse mit Daten- und Informationserhebungen für visualisierte Ergebnisdarstellungen und -entwicklungen in Echtzeit. Über Aufwandswerte, Leistungswerte, Kosten, Dauern und Mengen können Abhängigkeiten vorab geklärt, analysiert und ins Modell integriert werden. Durch die angepassten Prognosen kann abschließend interpretiert werden, wie die Zukunft ausschauen wird. [5, S. 4-5]

2.2 Building Information Modeling

Unter Verwendung von ‚Building Information Modeling‘ (BIM) können Gebäude oder andere Bauwerke geplant, gebaut und betrieben werden. Zusätzlich zu geometrischen Daten eines herkömmlichen 3D-Modells werden zu einzelnen Bauteilen verschiedenste Informationen hinterlegt. Durch Ergänzung der Dimensionen Zeit, Kostenerfassung und Lebenszyklus kann aus einem 3D- ein 6D-Modell entstehen. BIM basiert auf einer durchgängigen Nutzung über den gesamten Lebenszyklus teilweise bis zum Rückbau des Gebäudes. [10, S. 7-9]

Ein digitales Bauwerksmodell setzt sich aus einzelnen Modellen der Fachplaner zusammen. Das BIM-Modell kann durch unterschiedlichste Analyse- und Simulationswerkzeuge für die bauphysikalische Berechnung, die Statik oder die Ermittlung der Massen herangezogen werden. Ein wesentliches Element der digitalen Methode ist eine gemeinsame Datenumgebung für die Informationsverwaltung, das sogenannte CDE (engl. common data environment). Unter Anwendung des SSOT-Konzeptes (Single Source of Truth) kann garantiert werden, dass alle Beteiligten immer mit den aktuellen Modellen und Informationen arbeiten. Über Zugriffsrechte wird gesteuert, wer welche Informationen einsehen bzw. bearbeiten kann. [9, S. 12-13]

Um eine schnittstellenfreie Zusammenarbeit zu ermöglichen, hat die Non-Profit-Organisation buildingSMART International bSI (ehemals Internationale Allianz für Interoperabilität (IAI)) das einheitliche Datenaustauschpaket ‚Industry Foundation Classes‘ (kurz IFC) entwickelt. Das herstellerunabhängige Dateiformat ermöglicht es, Koordinationsmodelle trotz der Anwendung in unterschiedlichen Softwareprodukten füreinander kompatibel zu machen und die Daten untereinander auszutauschen. Festgelegt ist der Standard in der ISO 16739. [10, S. 14-15]

Die Wiedernutzung einmal erzeugter digitaler Informationen ohne aufwändige und fehleranfällige Wiedereingabe ist das Ziel dieser Methode, mit der automatisch eine Steigerung der Effizienz in Planung und Realisierung einhergeht. Zurzeit ist der Grad der Wiedernutzung der digitalen Informationen im Bauwesen noch sehr gering, vor allem im Vergleich zu anderen Branchen. Sinnbildlich steht die Bauindustrie für die in Abbildung 2-1 dargestellte rote Linie: Ineffizienz durch einen inkonsistenten digitalen Prozess.

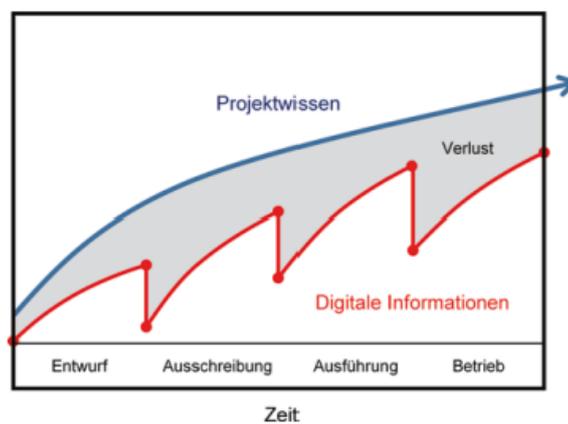


Abbildung 2-1: Informationsverlust zwischen Projektphasen [10, S. 3]

Das Wissen über das Projekt steigt mit der fortlaufenden Zeit an. Werden die Informationen aber nicht über die verschiedenen Projektphasen konsequent weitergegeben, gehen sie verloren oder müssen aufwändig erneut erzeugt werden. Hier setzt die digitale Bauwerksmodellierung an, indem das Modell inklusive aller über die Zeit generierten Informationen weitergegeben und -bearbeitet wird. [10, S. 2-3]

Die Einführung von BIM ist international sehr unterschiedlich vorangeschritten. Vor allem die skandinavischen Staaten sowie England und die USA gelten als Vorreiter. In diesen Ländern ist die Anwendung durch Vorschriften und Auftraggeberforderungen teilweise verpflichtend. [11, S. 9] In Deutschland wird seit 2015 mit der Veröffentlichung des Stufenplans des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (ehemals Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) die Entwicklung stufenweise vorangetrieben. Im Infrastrukturbereich ist die Anwendung von BIM bei öffentlichen Aufträgen seit 2020 allgemein verpflichtend. [12, S. 5] Auch der Hochbau geht mit dem Trend: der Masterplan BIM vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat soll die Unternehmen etappenweise an die Nutzung der Methode heranführen. Seit 2022 gilt bei allen Bauten des Bundes die Pflicht zur Anwendung von Level I. Die erste von drei Stufen schreibt die Anwendung von neun Anwendungsfällen vor, die sich auf die Projektvorbereitungsphase und auf die Planung konzentrieren. Ab 2027 soll dann Level III für Projekte im Wert von über 0,5 Mio. Euro verpflichtend eingeführt werden. Zu dem

Zeitpunkt sind dann auch externe Genehmigungsprozesse, die Ausschreibung/Vergabe, die Bauphase und der Betrieb unter Anwendung von BIM verbindlich. [13, S. 14] In Österreich sind keine mit dem deutschen Stufen- oder Masterplan vergleichbaren staatlichen Programme vorhanden. Die ÖNORM A 6241-2 sowie beide Teile der ÖNORM A 2063 setzen jedoch einen hohen Standard, sodass die Bauunternehmen ermutigt werden, BIM zu implementieren. Zum Beispiel setzt die Österreichische Bundesbahn ÖBB die BIM-Methode seit dem 01.01.2024 verpflichtend ein. [14]

Die Entwicklung und Nutzung von BIM und auch von Künstlicher Intelligenz oder maschinellem Lernen schreitet dennoch schnell voran und wird populärer, wie die Untersuchung von Huang et al. zeigt. Besonders der rasante Anstieg von 5 veröffentlichten Publikationen im Jahr 2010 auf fast 100 im Jahr 2020 zum Thema BIM und maschinellem Lernen macht deutlich, dass die Forschung große Chancen darin sieht. Besonders für die Analyse von großen Datenmengen ist Anwendung von KI nützlich. [15, S. 2]

2.3 Tunnel Information Modeling

Building Information Modeling wird im Tunnelbau als ‚Tunnel Information Modeling‘ bezeichnet. TIM ist ein neuer Begriff, der durch die Stiftungsprofessur an der Universität Innsbruck geprägt wird. In der Fachliteratur ist er meist noch als ‚BIM im Untertagebau‘ oder ‚BIM im Tunnelbau‘ zu finden. Die in Kapitel 2.2 beschriebenen Punkte betreffen TIM gleichermaßen. Die digitale ganzheitliche Methode zur Bauwerksmodellierung wird erweitert und fokussiert sich auf den Infrastruktur- und Untertagebau. [16, S. 7]

Das integrale Tunnelmodell kann als virtuelles Gegenstück eines realen Bauwerks, als sogenannten digitalen Zwilling, abgebildet werden. Es erstreckt sich ebenfalls vom ersten Entwurf in der Planungsvorbereitung über die konkrete Planung, die Vorbereitung der Ausführung sowie den Bau bis hin zum Betrieb. Abbildung 2-2 stellt den vollständigen Kreislauf und die Beziehungen untereinander über die Pfeile dar. Eine eventuelle Sanierung am Ende der Lebensdauer schließt den Kreis. Der im Zentrum der Baumaßnahme stehende Digitale Zwilling steht dabei immer in einer Wechselbeziehung mit jeder Phase und wächst stetig weiter. [9, S. 5]

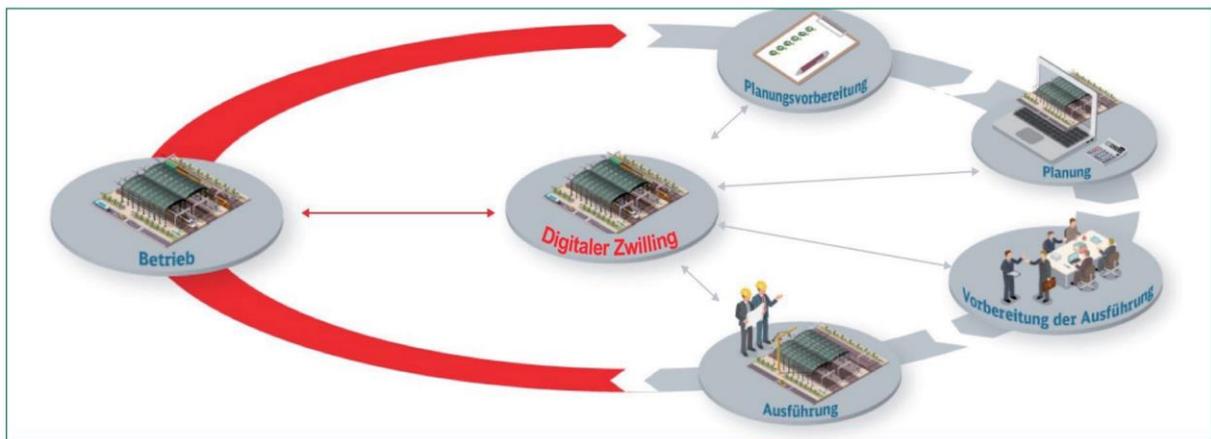


Abbildung 2-2: Die Phasen eines Modells bei der konsistenten Anwendung [9, S. 5]

Die maßgeblichen Unterschiede im Vergleich zum Hochbau stellen die Ungewissheit im Baugrund und die große Längsausdehnung des Bauwerks dar. Da es sich bei Infrastruktur- und Untertagebauten meist um lange, trassenartige, manchmal auch tiefliegende Projekte handelt, kann der vorhandene Baugrund trotz Vorauserkundungen kaum vollständig erkundet werden. Es ist also umso wichtiger, dass das Modell während der Bauphase mit aktuellen Informationen versorgt wird, um direkte Anpassungsmaßnahmen und realistische, ständig aktualisierte Termin- und Kostenschätzungen zu ermöglichen. Des Weiteren spielt die Langlebigkeit eine entscheidende Rolle. Im Tunnelbau sind die Projekte meist für eine Lebensdauer von 200 Jahren – und damit doppelt so lange wie zum Beispiel im Brückenbau – bemessen. Die Modelle müssen für den gesamten Lebenszyklus so aufgebaut werden, dass die Projektinformationen erhalten bleiben. Beispielhaft sollten immer offene Datenformate verwendet werden. [9, S. 6]

Die Interaktion zwischen Tunnelbauwerk und Baugrund ist im Untertagebau von großer Bedeutung. Zusätzlich haben die baubetrieblichen Aspekte wie die Baustelleneinrichtung und die Logistik einen maßgeblichen Einfluss auf die erfolgreiche Abwicklung eines Tunnelprojekts. Für eine optimale Modellierung wird daher in drei Teilmodelle unterschieden.

1. Bauwerksmodell
2. Baugrundmodell
3. Baustellenmodell

Das Bauwerksmodell bildet den Tunnel entlang seiner Achse inklusive der Querschläge, der Portale, der Lüftungsschächte usw. ab. Da die Bauteile sich entsprechend oft wiederholen, ist die Erstellung eines solchen Modells deutlich einfacher als im Hochbau. Wesentlich anspruchsvoller ist hingegen die Modellierung des Baugrunds. Trotz der erwähnten Prognoseungenauigkeiten müssen die Auswirkungen auf die temporären Bauwerkszustände, das Grundwasser und das Setzungsverhalten bei oberflächennahen oder innerstädtischen Bauwerken genau simuliert werden. Das Baugrundmodell sollte dementsprechend die Eigenschaften der geologischen Homogenbereiche wie zum Beispiel die verschiedenen Fels-

und Bodenklassen oder das Verformungsverhalten enthalten. Das Baustellenmodell berücksichtigt sämtliche Interaktionen von der Tunnelbohrmaschine über die Organisation bis zur Schichteinteilung des Personals. [17, S. 780-785]

TIM eröffnet neue Möglichkeiten für das Monitoring während der Ausführung. Über Verknüpfungen des Modells mit dem Terminplan können Unterschiede zwischen SOLL- und IST-Zustand zeitnah herausgearbeitet werden. Der aktuelle Vortriebsstand muss nicht mehr an einem ausgedruckten Plan an der Wand mit Geodreieck und Stift, sondern kann direkt digital auf einem Bildschirm visualisiert werden. Wie in Abbildung 2-3 gezeigt, wird der unterschiedliche Baufortschritt farblich hervorgehoben, um Abweichungen besser erkennen zu können. [18, S. 681]

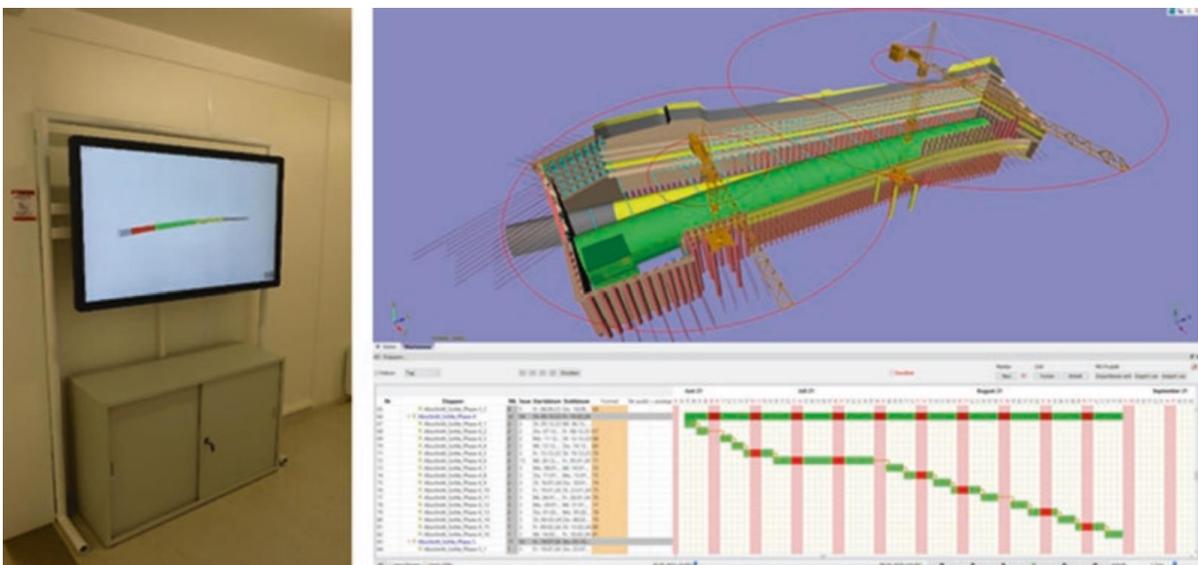


Abbildung 2-3: Baufortschrittskontrolle durch Verknüpfung mit Terminplan [18, S. 681]

Ein Nachteil der zunehmenden Digitalisierung kann die Schwierigkeit des Datenhandlings sein. Ein ‚Zuviel‘ an Daten verlangsamt Prozesse und sorgt für Chaos. Zielführend ist eine intelligente Verknüpfung mit einem BIM- bzw. TIM-Modell, in dem wesentliche Informationen bauteilbezogen zusammengefasst und gespeichert werden. [19, S. 339]

2.4 Dokumentation auf der Baustelle

Die Dokumentation schafft dauerhaft gespeichertes und abrufbares Wissen. Wesentliche Informationen der Bauarbeiten sind für den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks wertvoll und sollten nach dem Motto ‚so viel wie nötig, so wenig wie möglich‘ wirtschaftlich festgehalten werden. [20, S. 125]

2.4.1 Normative Grundlagen

In Österreich ist der Umfang der Dokumentation des Baufortschritts insbesondere in den Normen ÖNORM B 2110: ‚Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen‘ und ÖNORM B 2118: ‚Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen, unter Anwendung des Partnerschaftsmodells, insbesondere bei Großprojekten‘ geregelt. Normen beschreiben den Stand der Technik und es kann vorteilhaft sein, die Einhaltung vertraglich zu vereinbaren. In den Normen heißt es: *„Vorkommnisse (Tatsachen, Anordnungen und getroffene Maßnahmen), welche die Ausführung der Leistung oder deren Abrechnung wesentlich beeinflussen sowie Feststellungen, die zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr getroffen werden können, sind nachweislich festzuhalten.“* [21, S. 21, 22, S. 20] Dies kann sowohl in Form eines Bautagesberichtes als auch eines Baubuches passieren.

Ein Bautagesbericht umfasst Wetterverhältnisse, Arbeiter- und Gerätestand, Materiallieferungen, Leistungsfortschritt, Güte- und Funktionsprüfungen, Regieleistungen sowie alle sonstigen Umstände. Er ist vom Auftragnehmer zu führen und schnellstmöglich, spätestens jedoch nach 14 (ÖNB 2110) oder nach 7 Tagen (ÖNB 2118), nachweislich an den Auftraggeber zu übergeben. Sollte dieser nicht innerhalb der Frist von 14 Tagen Einspruch erheben, so gelten die Berichte als bestätigt. Der Auftraggeber kann ebenfalls selbst Eintragungen vornehmen.

Das Baubuch enthält die wichtigen Vorkommnisse der Vertragsabwicklung und wird vom Auftraggeber geführt. Hier kann auch der Auftragnehmer Eintragungen vornehmen. Er sollte in der Regel täglich, mindestens jedoch einmal wöchentlich, Einsicht nehmen. Widerspricht der Auftragnehmer nicht innerhalb von 14 Tagen, so gelten die Vorkommnisse als bestätigt.

Die Vertragspartner sind gehalten, die Dokumentation gemeinschaftlich durchzuführen. Die Kosten übernimmt der Vertragspartner, der die Routinedokumentation durchführt oder der diese gemäß Vertrag durchzuführen hat. [18, S. 20, 19, S. 21]

In Deutschland wird in der Regel Teil B der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (kurz VOB/B) als ‚Allgemeine Geschäftsbedingungen‘ vereinbart. Hinsichtlich der Dokumentationserfordernisse ist hier die DIN-Norm 1961 heranzuziehen. Konkrete Vorschläge oder Verpflichtungen zu einer Dokumentation des Baufortschritts sind jedoch nicht vorhanden. In §4 und §6 wird geregelt, dass bei Bedenken gegen Anordnungen des AG oder Behinderung schriftliche Ankündigungen vorgenommen werden müssen. [23, S. 5-7] Darüber hinaus können zusätzliche Vertragsbedingungen (ZVB) vereinbart werden. Diese dürfen laut VOB Teil A §8a den Allgemeinen Vertragsbedingungen nicht widersprechen. [24, S. 14] In den ZVB kann festgelegt werden, dass die Berichte alle Angaben enthalten müssen, die für die Ausführung und Abrechnung des Auftrages von Bedeutung sein können. Beispielsweise kann vereinbart

werden, dass die Berichte wie in Österreich wöchentlich an den Auftraggeber übergeben werden.

Zur vollständigen Abbildung des deutschsprachigen Raums wird ebenfalls ein Einblick in das Normenwerk des schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein (SIA) hinsichtlich der baubegleitenden Dokumentation vorgenommen. Bei außerordentlichen Umständen oder bei der Ausführung des Werkes bei gefährdenden Verhältnissen muss gemäß SIA 118 Artikel 25 bzw. 59 schriftlich protokolliert werden. Weitergehende Empfehlungen wie zum Beispiel eine Dokumentation über Bautagesberichte oder fördernde Punkte einer partnerschaftlichen Zusammenarbeit sind in der Norm nicht beschrieben. [25, S. 859, 26, S. 20-21]

2.4.2 Zweck der Dokumentation

Die vollständige Dokumentation soll den Bauablauf transparent darstellen und Abweichungen vom SOLL- im Vergleich zum IST-Zustand zeitnah erkennbar machen. Da ein gestörter Ablauf in vielen Fällen aufgrund von Beschleunigungsmaßnahmen oder einer Bauzeitverlängerung zu Mehrkosten führt, ist es von großer Bedeutung gewissenhaft und genau zu dokumentieren. Zur Erreichung der Projektziele müssen die Termine in der festgelegten Qualität zu den vereinbarten Kosten und Zeiten eingehalten werden. Ein zwischen den Vertragsparteien gemeinsam geplantes Dokumentationssystem kann dazu beitragen, die Baustelle und die Prozesse von und für alle Seiten transparent zu machen und damit helfen sie erfolgreich abzuschließen. In der Regel übernimmt der Auftragnehmer die aktive Rolle, da er dem Bauherrn die mangelfreie und termingerechte Erfüllung seiner aus dem Vertrag hervorgehenden Leistungen bestätigen möchte. Analog zur Empfehlung der Normen übt der Auftraggeber in der Regel nur Überwachungs- und Kontrollfunktionen während der Bauausführung aus. Für ihn dient die Dokumentation der Abrechnungsprüfung sowie zur frühzeitigen Erkennung von Abweichungen hinsichtlich Qualität, Terminen und Kosten. Eine Auflistung der Anforderungen sowie der Ziele der Dokumentation beider Vertragspartner ist in Abbildung 2-4 zu finden. [27, S. 192]

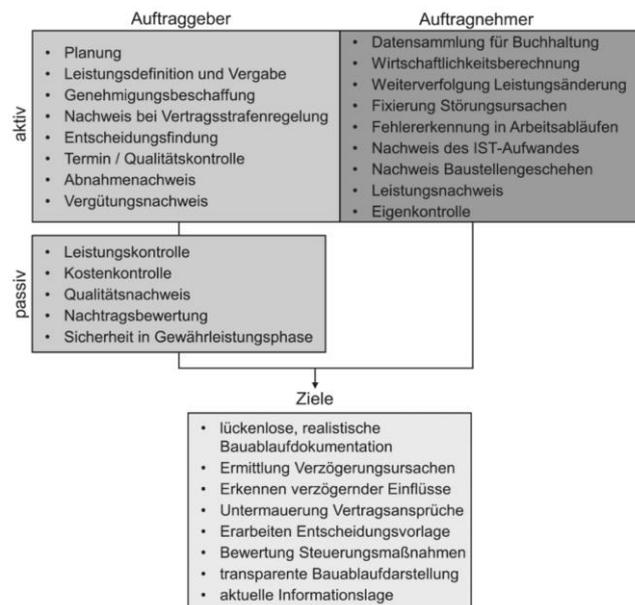


Abbildung 2-4: Anforderungen an die Dokumentation mit gemeinsamen Zielen [28, S. 679]

Es gelten folgende Grundsätze:

- „Je schneller sich die Vertragspartner um eine Einigung bemühen, desto geringer wird der Schaden sein.
- Je konsequenter dokumentiert wird, desto schneller lassen sich die Probleme erkennen und behandeln.
- Je klarer die frühzeitige Erkenntnis auf der Grundlage einer sauberen Termin- und Kostenkontrolle und auf der Grundlage einer baubetrieblich fundierten Anmeldung von Ansprüchen ist, desto geringer und behebbarer wird der Schaden sein und desto eher ist eine noch gütliche Einigung möglich.“ [29, S. 831]

Die Dokumentationsmittel, die für die Abwicklung einer Baumaßnahme von Bedeutung sind, können mit ihrer zeitlichen Zuordnung der Lebenszyklusphasen der Abbildung 2-5 entnommen werden.



Abbildung 2-5: Dokumentationsmittel mit zeitlicher Zuordnung [28, S. 688]

Für diese Arbeit spielen vor allem die Dokumente eine Rolle, die zur Zeit der Realisierung der Baumaßnahme im Tunnel entstehen. Speziell werden folgende Dokumentationsmittel betrachtet:

- Bautagesbericht
- Foto-/Videodokumentation.

Planlieferlisten, Besprechungsprotokolle, SOLL-IST-Vergleiche, Behinderungsanzeigen, Inverzugsetzungen, Mängelanzeigen, Planänderungstestate sowie die Terminpläne können allesamt aus dem Büro digital angefertigt werden.

Der Bautagesbericht wird als das Dokument mit der höchsten Beweislast angesehen. Aufgrund einer zeitnahen Übergabe an den Auftraggeber können Unstimmigkeiten kurzfristig festgestellt werden. [27, S. 197] Eine gegenseitige Unterschrift der Vertragspartner ist hilfreich, aber nicht zwingend notwendig für die Wirksamkeit des Dokumentationsmittels. [29, S. 842]

Wenn Bauzwischenstände später nicht mehr ersichtlich sind, kann die Foto- oder Videodokumentation als Beweissicherung dienen. Sie unterstützt Aussagen zur vollbrachten Leistung. Damit die Dokumentation beweiskräftig ist, sollten neben Zeit und Ort zum Beispiel auch Informationen eingebauter Materialien festgehalten sein. Um die große Menge von Dokumenten strukturiert zu speichern, bieten sich Datenbanken an. Mithilfe von Filterfunktionen können Fotos oder Videos schnell gefunden werden. [27, S. 199]

Im Tunnelbau sollten je nach Vortriebsart weitere Informationen zur Routinedokumentation aufgenommen werden, vergleiche Kapitel 2.5.

Da im Tunnelbau in der Regel im Mehrschichtbetrieb gearbeitet wird, müssen kontinuierlich Informationen weitergegeben werden – von Schichtführung zu Schichtführung, zur Bauleitung, zur Projektleitung, zur Planung und zum Auftraggeber. Sämtliche Informationen müssen strukturiert und für alle Beteiligten wiederauffindbar abgelegt werden.

Bei Nachtragsforderungen kann eine Dokumentation als Untermauerung dienen. Werden Bautagesberichte vollständig geführt, können Abweichungen vom Vertrag im Sinne einer Leistungsänderung zeitnah begründet werden. [30, S. 358]

Auch nach Fertigstellung der Baumaßnahme hat die abgeschlossene Dokumentation einen hohen Stellenwert. Im Nachgang können Auswertungen durchgeführt und Erkenntnisse für zukünftige Projekte gewonnen werden. Informationen zu den Bauteilen und den Entstehungsprozessen sind entsprechend der gesetzlichen Aufbewahrungsfristen für Baudokumente zu archivieren. Mindestens bis zur Verjährung der Mängelansprüche müssen diese Dokumente gespeichert werden. [28, S. 318-321]

Die baubetriebliche Dokumentation ist somit nicht nur als Hilfsmittel für beide Vertragspartner zur erfolgreichen Steuerung, sondern auch als Beweismittel im Falle von Rechtsstreitigkeiten der Vertragspartner unverzichtbar. [29, S. 650]

2.5 Dokumentation im Tunnelbau

Mit den in Kapitel 2.3 beschriebenen Besonderheiten im Tunnelbau, vor allem der Ungewissheit im Baugrund, gehen auch spezielle Anforderungen an die Dokumentation einher. Diese werden im folgenden Kapitel näher erläutert.

2.5.1 Überblick der Vortriebsmethoden

Untertagebauarbeiten werden in zwei übergeordnete Vortriebsmethoden unterteilt:

- Zyklischer bzw. konventioneller Vortrieb (in Österreich in der ÖNORM B2203-1 geregelt):
 - „Vortriebsart, bei der die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und der Verfuhr sowie des Stützmitteleinbaus im Wesentlichen zeitlich nacheinander und mit Hilfe von Einzelgeräten ausgeführt werden“ [31, S. 9]
- Kontinuierlicher bzw. maschineller Vortrieb (in Österreich in der ÖNORM B2203-2 geregelt):
 - „Vortrieb mit Hilfe einer Tunnelvortriebsmaschine (Tunnelbohrmaschine, Schild u. dgl.), bei welchem die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und der Verfuhr sowie des Ausbaus im Wesentlichen gleichzeitig ausgeführt werden“ [32, S. 8]

Für diese Arbeit wird die Kenntnis der Grundlagen von beiden Vortriebsmethoden vorausgesetzt.

Eine ausführliche Erklärung des zyklischen Vortriebs kann dem Skript ‚Angewandter Tunnelbau‘ von Flora und Türtscher entnommen werden. Die wesentlichen Schritte eines Zyklus (Bohren, Laden und Besetzen, Sprengen, Lüften, Bereissen, Schüttern und Sichern), die technischen Grundsätze der NÖT (‚Neue Österreichische Tunnelbauweise‘, auch unter ‚New Austrian Tunneling Method‘ NATM bekannt), die Möglichkeiten des Stützmitteleinbaus sowie die bauwirtschaftlichen Grundlagen sind darin zu finden. [33, S. 3-71]

Das Basiswissen zum maschinellen Vortrieb erläutert Türtscher in seiner Dissertation ‚Analyse und Prognose von Penetration und Vortriebsgeschwindigkeit bei maschinellen Vortrieben im Festgestein‘. Der Ablauf der Gesteinslösung mit Tunnelbohrmaschinen sowie die maschinentechnischen Grundlagen und deren Funktionsweise werden umfassend erklärt. [19, S. 80-145] Für weitergehende Informationen zu Tunnelbohrmaschinen hinsichtlich der Anwendung, der Typisierung und der Auswahlkriterien wird auf die ‚Empfehlung zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen‘ des DAUB hingewiesen. [34, S. 8-33]

Die Wahl der Vortriebsmethode ist abhängig von verschiedenen Faktoren. Sie stellt eine der größten Herausforderungen bei der Tunnelbauplanung dar. Durch Erfahrungen aus abgeschlossenen Tunnelbauprojekten sind zwar Tendenzen vorhanden, welche Vortriebsmethode in den jeweiligen projektspezifischen Gegebenheiten am sinnvollsten sein könnte, allgemeingültige Aussagen können jedoch nicht getroffen werden. Flora und Teuscher haben ein dynamisches Entscheidungsmodell entwickelt, das folgende Hauptkomponenten berücksichtigt:

- Methodeneignung
 - o Geotechnische und systemtechnische Machbarkeit (z. B. Tunnellänge, Querschnittsgestaltung oder Beschaffenheit des Baugrundes)
 - o Umwelt- / Genehmigungsfähigkeit (z. B. Umweltverträglichkeitsprüfung)
 - o Umfeld / Akzeptanz (z. B. Lärm- und Erschütterungseinflüsse, Setzungsverhalten)
- Quantitative Methoden Aspekte
 - o Bauzeit und Baukosten
 - o Risiken (Gebirge, System, Umfeld)
- Qualitative Methoden Aspekte
 - o Beteiligte (z. B. Fachkompetenzen)
 - o Vertragsmanagement
 - o Lebenszyklusaspekte (z. B. Bauwerksqualität)
 - o Marktpotenzial
 - o Strategie / Innovation.

Der genaue Ablauf eines dynamischen Entscheidungsmodells zur Findung der optimalen Methode ist im Betonkalender 2014 zu finden. Mit Hilfe des Modells kann für jedes Tunnelprojekt abgewogen werden, ob die zyklische oder die kontinuierliche Vortriebsmethode besser geeignet ist. [35, S. 63-86]

2.5.2 Normative Grundlagen zur Dokumentation im Tunnel

Die geforderten Leistungen des Auftragnehmers hinsichtlich der Dokumentation eines Tunnelprojektes sollten vertraglich vereinbart werden. In den Tunnelbaunormen sind die Mindestanforderungen an die Dokumentation für die beiden Vortriebsmethoden sehr ähnlich. ÖNORM B 2203-1: ‚Untertagebauarbeiten – Teil 1: Zyklischer Vortrieb‘ und auch ÖNORM B 2203-2: ‚Untertagebauarbeiten – Teil 2: Maschineller Vortrieb‘ unterteilen die Dokumentation in drei Haupt- und jeweils weitere Subkategorien (die *kursiv* geschriebenen Punkte betreffen nur den maschinellen Vortrieb):

1. Baugeologische Dokumentation
 - a. Erfassung geologischer und hydrogeologischer Verhältnisse des Gebirges
 - b. Charakterisierung der Gebirgsarten
 - c. Vergleich zwischen erwarteten und tatsächlichen Verhältnissen
2. Geotechnische Messungen
 - a. Interpretation und Umsetzung bei den Vortriebsarbeiten
3. Tunnelbautechnischer Bestand
 - a. Dokumentierte geologische Verhältnisse
 - b. Vortriebsklassen, *Regelvortriebe*, *Sondervortriebe*, *Ereignisbewältigung*
 - c. Menge und Art der Stützmittel (evtl. Auslastung) und Zusatzmaßnahmen
 - d. Sondermaßnahmen / Besonderheiten
 - e. Regelprofile und Sohlausbildung
 - f. Ort und Art der Hauptmessquerschnitte
 - g. Ergebnisse der Verschiebungsmessungen
 - h. Bergwasserzutritte im Vortriebsbereich und Ganglinie der Wassermengen
 - i. Entwässerungen und Abdichtungen
 - j. Betongüte und Bewehrung mit Dicke der Innenschale
 - k. Art und Ort der Messquerschnitte in der Innenschale
 - l. Verschiebungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Einbaus der Innenschale
 - m. Hinweise auf Standsicherheitsberechnungen
 - n. *Verteilung der Tübbingtypen*
 - o. *Relevante Betriebsdaten der Tunnelbohrmaschine (TBM)*
 - p. *Art und Verteilung der Ringspaltverfüllung*. [31, S. 28-29, 32, S. 38-39]

Für den maschinellen Tunnelbau wird vorgeschlagen, dass die Art und der Umfang der Dokumentation je nach TBM-Typ projektspezifisch fixiert werden. [32, S. 35]

2.5.3 Stand der Technik

Jedes Tunnelbauunternehmen hat eigene Vorstellungen von einer effektiven Baustellendokumentation. Die Normen geben die Kerninformationen, die mindestens enthalten sein müssen, vor. Dennoch ist eine große Varianz zwischen einzelnen Tunnelbauunternehmen mit den unterschiedlichen Anforderungen der projektspezifischen Rahmenbedingungen vorhanden, da Berichtsinhalte nicht genormt sind.

Der Bautagesbericht (auch Vortriebsbericht genannt) stellt in der Regel den Ausgangspunkt der Dokumentation dar. Mit den allgemeinen Informationen (Datum, Uhrzeit), dem Zyklusdiagramm, der Zeiterfassung des Personals, Tätigkeiten, den Material- und Gerätedaten sowie sonstigen Vorkommnissen enthält das Dokument zunächst alle wesentlichen Standardinformationen. [36, S. 156-161]

Im Falle von Abweichungen der vertraglich vereinbarten Bauleistungen werden ggf. Feldaufmaßblätter erstellt. Abweichende oder zusätzliche Leistungen, die auf Anordnung des Bauherrn durchgeführt werden, sind gesondert zu vergüten. Das Dokument stellt den Nachweis dar und enthält in der Regel das Datum, eine genaue Verortung, den Zeitraum sowie Angaben zur Art der Leistungserbringung. Zusätzlich sollten Fotos als Nachweis angehängt werden. [37, S. 47]

2.5.3.1 Zyklischer Vortrieb

Standardmäßig kommen im konventionellen Tunnelbau mindestens die folgenden drei Dokumente täglich zum Einsatz:

- Bautagesberichte
- Zyklusdiagramme
- Abschlagsblätter (auch Stützmitteleinbauprotokoll genannt). [37, S. 36]

Der Bautagesbericht fasst die Ereignisse des Tages zusammen und wird wie oben erwähnt mit den Informationen des Zyklusdiagramms und der Abschlagsblätter gefüllt.

Das Zyklusdiagramm hält die Dauer der innerhalb der Zyklen durchgeführten Arbeitsschritte chronologisch in 15 Minuten Intervallen fest. Die Tabelle, mit der Zeit auf der horizontalen und den Aktivitäten (Bohren, Laden und Besetzen, Sprengen, Lüften, Bereissen, Schuttern und Sichern) auf der vertikalen Achse, wird meist als ‚Gantt-Balkendiagramm‘ dargestellt. Informationen zu der Mannschaft, dem schichtführenden Polier, der Abschlagsnummer sowie den besonderen Ereignissen wie Störungen oder nicht regelmäßig wiederkehrenden Vorkommnissen (zum Beispiel Nachziehen der Lutte) vervollständigen das Protokoll. Es ist ein Zyklusdiagramm pro Tag und Vortrieb vorgesehen. [37, S. 39-41]

Die Abschlagsblätter enthalten Informationen zu Art und Menge der eingebauten Stützmittel und werden pro Abschlag erstellt. Beispielsweise werden die gesetzten Anker und Spieße, die aufgetragene Spritzbetondicke und die eingebauten Baustahlgitter aufgenommen. Diese Dokumentation dient der Kontrolle der Tunnelstatik sowie der Abrechnung. Ebenfalls notiert werden die Abschlagslänge, der Vortriebsbereich (Kalotte, Strosse, Sohle etc.) sowie der Name des schichtführenden Poliers. [37, S. 45]

„Der Dokumentationsprozess im zyklischen Tunnelvortrieb ist bis dato noch kein durchgängig standardisierter Prozess.“ [36, S. 155] Kvasina et. al haben 2018 bei Untersuchungen festgestellt, dass trotz digitaler Möglichkeiten weiterhin hauptsächlich handschriftlich auf Formularen und Checklisten dokumentiert wird. Wichtige Daten werden zeitaufwändig und fehleranfällig digitalisiert, ansonsten eingescannt oder in Ordnern abgelegt. Die Relevanz optimierter Dokumentationsprozesse wird deutlich, wenn man die Zeit, die für die Dokumentation aufgewendet wird, genauer betrachtet. Über Experteninterviews haben die AutorInnen herausgefunden, dass Poliere 20 % und BauleiterInnen sogar 50 % ihrer Arbeitszeit mit der Dokumentation beschäftigt sind. Würden die Poliere die Daten gleich in verarbeitbarer Form festhalten, könnte die Bauleitung viel Zeit und Geld sparen.

Um eine laufende digitale Erfassung zu ermöglichen, haben Kvasina et al. eine Web-Applikation entwickelt, bei der Aktivitäten am Smartphone oder Tablet erfasst werden. Auf dem Tablet oder dem Smartphone kann die Dauer inklusive Anfangs- und Endzeit über eine Markierung von Zeitintervallen mit einem Eingabestift oder dem Finger eingetragen werden, wie in Abbildung 2-6 zu sehen ist. Alternativ ist die Eingabe der Aktivitätszeit über die Tastatur möglich, vergleiche Abbildung 2-7 auf der rechten Seite. Exakte Ergebnisse liefert die Option, die Zeit während der Aktivität über die Start- und Stopptasten aufzuzeichnen, vergleiche Abbildung 2-7 auf der linken Seite. [36, S. 155-161]

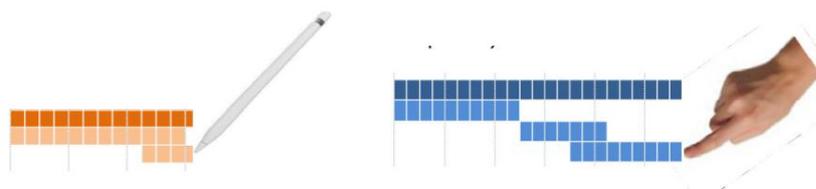


Abbildung 2-6: Markierung der Zeitintervalle am Tablet oder Smartphone [38, S. 82]

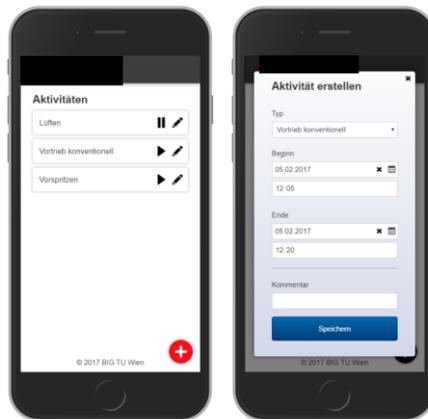


Abbildung 2-7: Digitale Möglichkeiten der Zeiteingabe von Aktivitäten [39, S. 19]

Die Speicherung der Echtzeitdaten im Tunnel soll zentral über WLAN erfolgen, um die Informationen direkt weiterverwenden zu können. Im Hintergrund wird automatisch das Stützmittelprotokoll, der Stundenbericht und das Zyklusdiagramm aus den vom Polier zur Verfügung gestellten Daten generiert. Diese Berichte werden direkt an die betroffenen Stellen weitergeleitet, sodass daraufhin der Bautagesbericht durch die Bauleitung erstellt und abgelegt werden kann. Über eine hierarchische Rollenvergabe können die Beteiligten online prüfen, kommentieren, unterschreiben und freigeben. Dabei sollte der Bearbeitungsstatus jederzeit ersichtlich sein. [36, S. 155-161]

Wie die Ausarbeitung des Dokumentationsprozesses im Falle einer idealen, durchgängig digitalen Arbeitsweise im zyklischen Vortrieb aussehen könnte, ist in Abbildung 2-8 dargestellt. Um den Weg, den ein Dokument nach der Erstellung geht, aufzuzeigen, sind die nachfolgenden Stellen der Vollständigkeit halber ebenfalls mit aufgenommen. Sowohl die Abrechnungs- als auch die Personalabteilung profitieren von den digitalen Daten. Sie können die Berichte digital prüfen und die Daten wie in diesem Beispiel mit der Bauprojektmanagement Software ‚iTWO‘ sofort weiterverarbeiten.

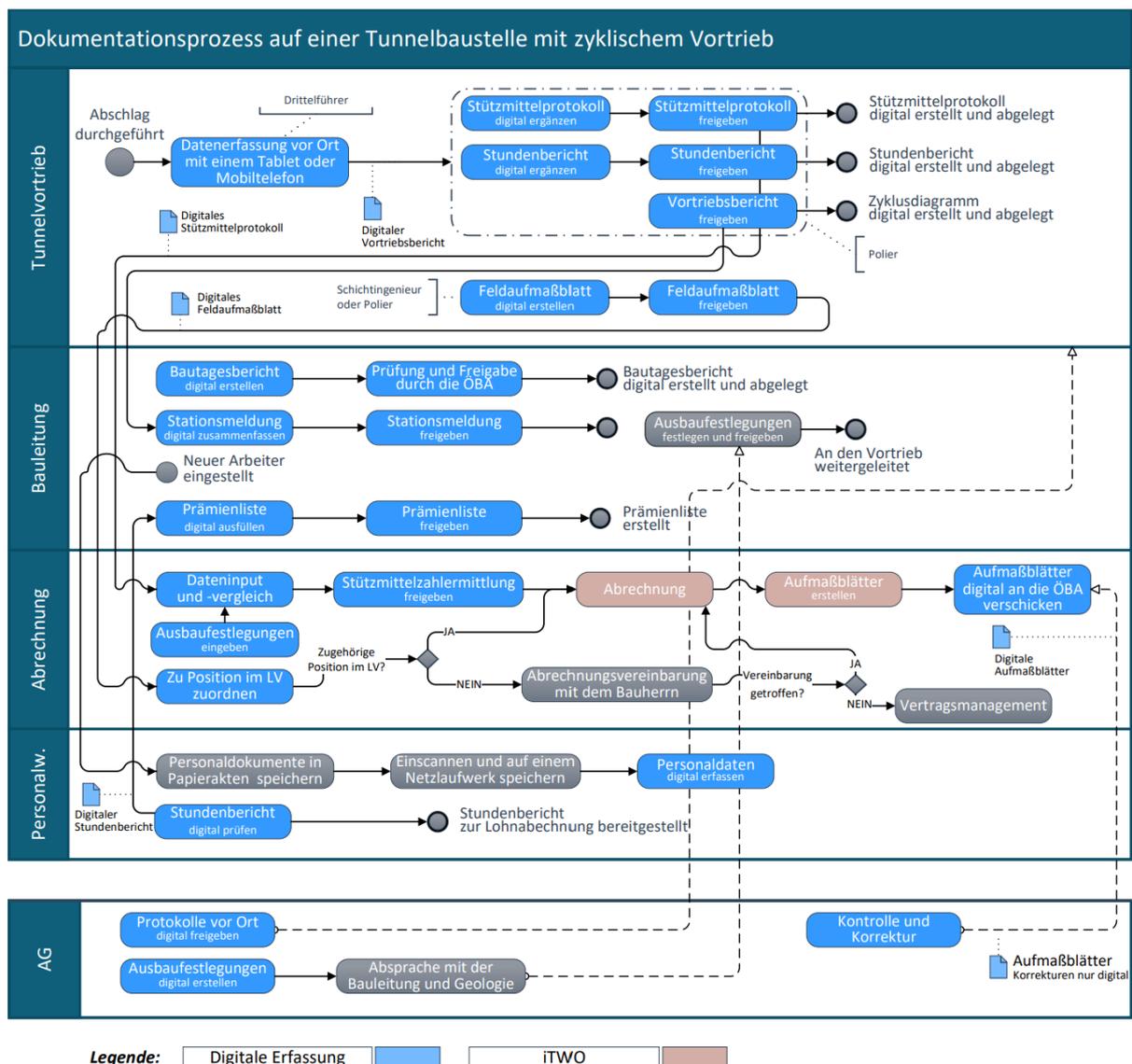


Abbildung 2-8: Dokumentationsprozess bei digitaler Arbeitsweise [38, S. 88]

Bei dem ‚Tunneling Information Management System (TIMS)‘ handelt es sich ebenfalls um ein digitales Werkzeug, mit dem Tunnelbauprozesse digital dokumentiert werden können. Huymajer et al. von der Montanuniversität Leoben haben ein Softwaretool programmiert, das auf einem Klassendiagramm basiert. Die erhobenen Daten werden strukturiert in Klassen abgelegt und orientieren sich an einem Flussdiagramm. Der Datenfluss wird im Vergleich zur analogen Form nicht verändert, lediglich die Eingabe in die EDV entfällt. Die für den Nutzer sichtbare Oberfläche ist sehr ähnlich zu der aus Abbildung 2-6 bzw. Abbildung 2-7. [40, S. 259-264]

2.5.3.2 Kontinuierlicher Vortrieb

Für den kontinuierlichen Vortrieb sind neben den üblichen Berichten folgende Dokumente relevant:

- Maschinentagesberichte
- Meißelprotokolle
- Geologisch-geotechnische Aufzeichnungen
- Maschinendatenaufzeichnungen. [19, S. 294]

Im Maschinentagesbericht (der auch im kontinuierlichen Vortrieb als Zyklusdiagramm bekannt ist) werden die Tätigkeiten in 5 Minuten Intervallen festgehalten. Folgende Angaben sind mindestens gefordert:

- Bohren
- Verspannen
- Tübbingeinbau
- Meißel
- Ausdehnung der Wartung
- Unterbrechung der Versorgung
- Reparatur
- Außerplanmäßige Wartung
- Andere Gründe für Stillstand wie zum Beispiel Geologie.

Des Weiteren sind folgende Informationen von Bedeutung:

- Datum, Schicht und Maschinist
- Start- und Endposition, Vortriebsleistung
- Maschinenstunden
- Hubweise Aufzeichnung der wichtigsten Maschinendaten
- Eingebaute Stützmittel
- Abweichung der Endposition am Schichtende. [41, S. 31-33]

Einen großen Einfluss auf die Vortriebsgeschwindigkeit und die Kosten haben die Meißel im Bohrkopf bzw. im Schneidrad. Zur Überwachung des Meißelverschleißes werden sie in der Regel täglich gewartet. Der dabei gemessene Abrieb der Schneidringe mit einem eventuell folgenden Meißelwechsel soll dokumentiert werden. Folgende Daten sind für das Protokoll von Bedeutung:

- Datum und Station
- Einzelne Schneidspuren mit
 - o Grenzwert des Abriebs
 - o Gemessener Verschleiß
 - o Meißelnummer
 - o Verschleißform
 - o Bemerkungen. [19, S. 298-300]

Die geologische Aufzeichnung ist abhängig davon, ob die TBM offen oder mit einem Schild gefahren wird. Bei der offenen TBM sind die geologischen Verhältnisse gut zugänglich, bei einem Schild hingegen ist der Zugang nur über kleine Fenster oder bei zurückgezogenem Bohrkopf möglich. Obwohl digitale photogrammetrische Aufnahmemöglichkeiten existieren, wird weiterhin oft nach der konventionellen Methode dokumentiert. Das Protokoll soll in beiden Fällen folgende Daten enthalten:

- Stationierung, Orientierung, Tunnelachse
- Geotechnik
 - o Stützmitteleinbau
 - o Ausbruchklassen
- Geologie
 - o Gesteinsansprache (tektonische Einheit)
 - o Trennflächenaufnahme (Kartierung)
 - o Probenentnahme
 - o Felstemperatur
 - o Besondere Ereignisse
- Bergwasserzutritte (Station, geschätzte Menge, Abklingverhalten). [19, S. 302]

In der Regel zeichnen Tunnelbohrmaschinen ihre Maschinendaten automatisch auf, sodass es keiner zusätzlichen Dokumentation bedarf. Von der Software des Maschinenherstellers werden beispielsweise das Datum, die Zeit, die Ringnummer, der Status (Vortrieb oder Stillstand), die Penetration in [mm/Umdrehung], die Vortriebspresenkraft in [kN] und das Drehmoment des Schneidrads in [MNm] aufgenommen. Da diese Daten üblicherweise in 10-Sekunden-Intervallen aufgezeichnet werden, wird eine hubweise Zusammenfassung empfohlen. Unter einem Hub wird ein Zyklus vom Ausbruch bis zur Stützung des Hohlraumes in Form der Fertigstellung eines Tübbingrings verstanden. Die große Datenmenge ist für eine Auswertung ansonsten schwierig zu beherrschen. [19, S. 304]

3 Baustellenanalyse

Im folgenden Kapitel werden die drei untersuchten Baustellen nacheinander vorgestellt und analysiert. Jede Baustelle wurde drei bis fünf Tage baubegleitend beobachtet. Um objektive Daten generieren zu können und die Baustellen somit vergleichbar zu machen, wurde im Vorhinein ein Bewertungsbogen entwickelt, der in Abbildung 3-1 zu sehen ist. Anhand dieses Bewertungsbogens orientiert sich die immer gleich strukturierte Evaluierung jedes einzelnen Tunnelprojekts. Zunächst werden die Oberkategorien ‚Allgemeiner Überblick‘, ‚Digitalisierung‘ und ‚Softwarelösung‘ unterschieden. Jede Oberkategorie wird nochmal in weitere Kategorien geteilt. So wird zum Beispiel die Digitalisierung mit den Kategorien ‚Was wird dokumentiert?‘, ‚Kommunikation‘ und ‚Automatisierung/Robotik‘ gefüllt. Diese werden wiederum einzelne Unterkategorien enthalten. Beispielhaft wird ‚Was wird dokumentiert?‘ aus ‚Geräte‘ und ‚Sensoren‘ bestehen und damit bestmöglich den IST-Zustand auf den Baustellen widerspiegeln. Der ausformulierte Bewertungsbogen ist Anhang 1 zu entnehmen. Die Besonderheiten sowie die Unterschiede des konventionellen und maschinellen Vortriebes werden hervorgehoben. Darauf folgend werden in dem Zuge die Baustellen gegenübergestellt und bewertet.

Um die Forschungsfragen detailliert beantworten zu können, wurden während der Besuche auf den drei Baustellen jeweils zwei Interviews mit den für die Dokumentation verantwortlichen Personen auf den Baustellen durchgeführt. In der Regel handelt es sich dabei um den Bauleiter und den Polier bzw. den Schichtbauleiter. Dafür ist ein standardisierter Interview-Leitfaden entwickelt worden, der in Anhang 2 zu finden ist. Die Auswertung der Interviews erfolgt im folgenden Kapitel für alle drei Baustellen gesammelt.

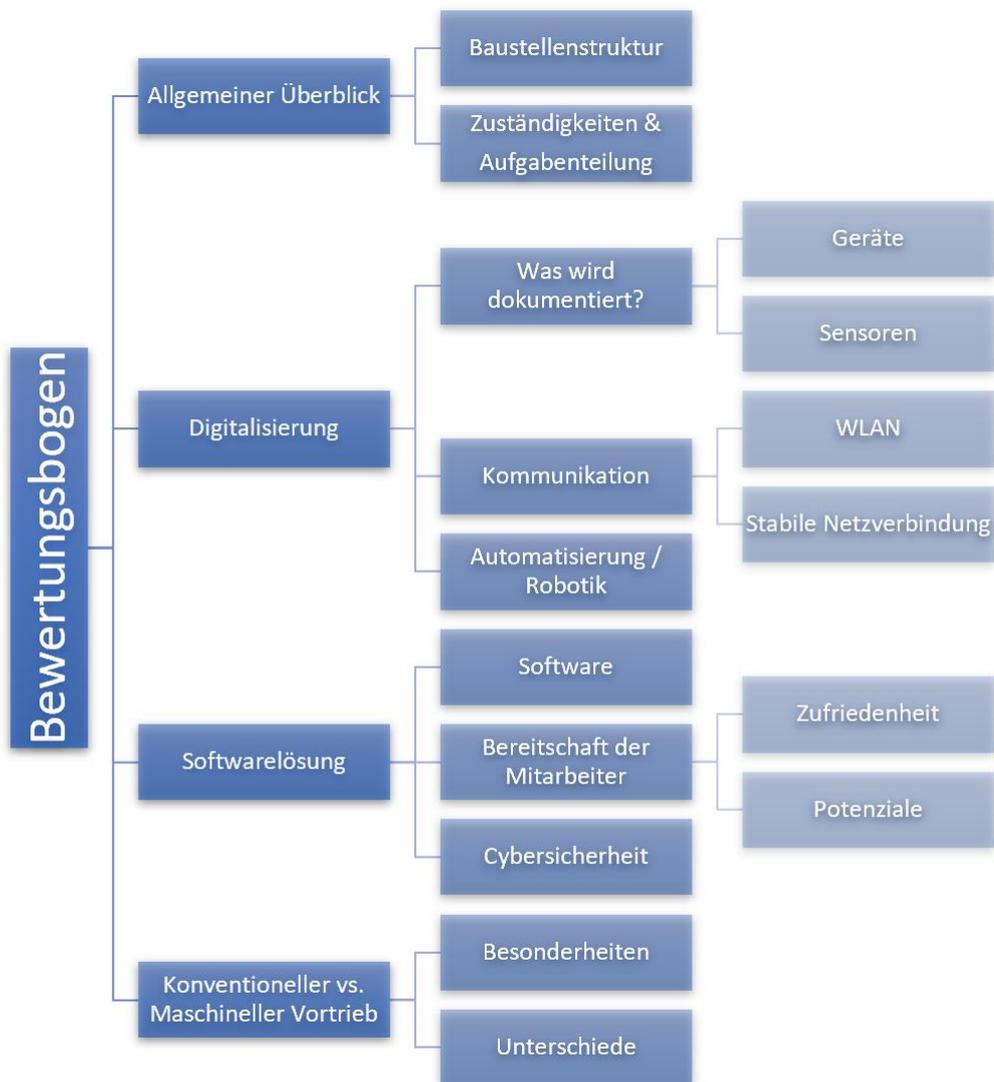


Abbildung 3-1: Bewertungsbogen als Flussdiagramm

3.1 Baustelle A

Baustelle A ist eine im konventionellen bzw. zyklischen Vortrieb betriebene Tunnelbaustelle. Es handelt sich um einen Rohbaustollen mit Querschlägen, der später als Rettungstunnel dienen soll. Die Bauzeit beträgt ca. 2,5 Jahre. Das Projekt wird von einer ARGE aus zwei Tiefbauunternehmen ausgeführt, die jeweils ungefähr 500 MitarbeiterInnen und viel Erfahrung im Tunnelbau haben.

3.1.1 Allgemeiner Überblick

Um ein besseres Verständnis für das anonyme Projekt zu bekommen, ist der Tunnelquerschnitt in Abbildung 3-2 zu sehen. Der Bohrwagen mit zwei Bohrräumen bohrt die für die Sprengung notwendigen Bohrlöcher nach dem Sprengmuster.



Abbildung 3-2: Bohrwagen im Einsatz

3.1.1.1 Baustellenstruktur

Es wird im Schichtbetrieb mit zwei Schichten insgesamt 20 Stunden pro Tag, sieben Tage die Woche gearbeitet. Zwei Bauleiter leiten die Tunnelbauarbeiten. Die gewerblichen Kolonnen bestehen jeweils aus einem Polier und vier Mineuren. Jeder Bauleiter arbeitet neun Tage am Stück und hat im Anschluss fünf Tage frei. Damit eine gute Übergabe stattfinden kann, überschneiden sich die Präsenzzeiten jeweils um zwei Tage. Die gleiche Taktung wird bei den GeologInnen und den GeotechnikerInnen angewendet, damit immer jeweils mindestens eine fachkundige Person vor Ort auf der Baustelle ist.

Eine Besonderheit an dieser Baustelle ist der ‚Allianz-Vertrag‘ zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer. Dieses partnerschaftliche Geschäftsmodell ist ein Novum im Tunnelbau und soll Zusammenarbeit und Transparenz fördern. Es beeinflusst viele Faktoren auf der Baustelle, unter anderem die Dokumentation des Auftragnehmers. Obwohl sämtliche Kosten 1:1 an den Auftraggeber weitergegeben werden können, erfolgt die Abrechnung von Baustoffen (z. B. Beton und Stahl) sowie von Ausbruchmaterial über den Auftragnehmer.

3.1.1.2 Zuständigkeiten & Aufgabenteilung

Auf Baustelle A werden bereits digitale Möglichkeiten genutzt. Die Zuständigkeiten sind klar geregelt, dies veranschaulicht Tabelle 3-1. Vor Baustellenbeginn legt die Bauleitung ein neues Projekt in einer Dokumentationssoftware an und teilt das Personal in Form eines Projekt-,

Personal- & Bereitschaftsplanes (auch Dekadenplan genannt) ein. Sind die allgemeinen Informationen zum Bauvorhaben eingetragen, wird der Polier zum Hauptakteur der Dokumentation der Bauarbeiten. Er ist am nächsten am Geschehen und protokolliert den tatsächlichen Baufortschritt. Bevor die Daten weiterverarbeitet, gespeichert und weitergeleitet werden, gibt es einen Rücklauf zur Bau- und Projektleitung. Sowohl der Polier als auch die Bauleitung sowie die Projektleitung arbeiten vollständig digital. Dennoch findet nur die Fotodokumentation im Tunnel statt, die weiteren Prozesse beginnen im Polierbüro.

Polier	Bauleitung	Projektleitung
<ul style="list-style-type: none"> • Vortriebszyklusdiagramm (Haupttätigkeit, Nebentätigkeit, Geräteschäden) • Geräteausfallbericht • Abschlagsprotokoll 	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlagenpflege der Eingabedaten (Bauteile, Personen, Tätigkeiten, Geräte, Material sowie Nachunternehmer) 	<ul style="list-style-type: none"> • Überprüfung der Daten
<ul style="list-style-type: none"> • Zeiterfassung (Stundenbericht auf Monatsbasis) 	<ul style="list-style-type: none"> • Freigabe der Stundenberichte des gewerblichen Personals 	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinierung und Freigabe an Bauherrn
<ul style="list-style-type: none"> • Fotodokumentation (mit Filterfunktion) 	<ul style="list-style-type: none"> • Dekadenplan für Personal 	<ul style="list-style-type: none"> • Rücklaufeinforderung
<ul style="list-style-type: none"> • Bautagesbericht 	<ul style="list-style-type: none"> • Freigabe der Bautagesberichte 	

Tabelle 3-1: Zuständigkeiten bei Baustelle A

3.1.2 Digitalisierung

Der Polier ist verantwortlich für die Baustellendokumentation. Im Tunnel selbst wird jedoch weder Stift und Zettel noch Tablet oder ähnliches für die Protokollierung genutzt. Lediglich das Smartphone kommt zum Einsatz.

3.1.2.1 Was wird dokumentiert?

Der Polier fotografiert die wichtigen Arbeitsschritte und besonderen Ereignisse. Im Nachgang fertigt er am Computer im Büro das Zyklusdiagramm und damit einhergehend den Bautagesbericht an, vergleiche Abbildung 3-3. Anhand der Uhrzeiten der Fotos kann er rückwirkend genau eintragen, wie lange die jeweiligen Arbeitsschritte gedauert haben, insofern er tatsächlich alle Ereignisse fotografiert hat.

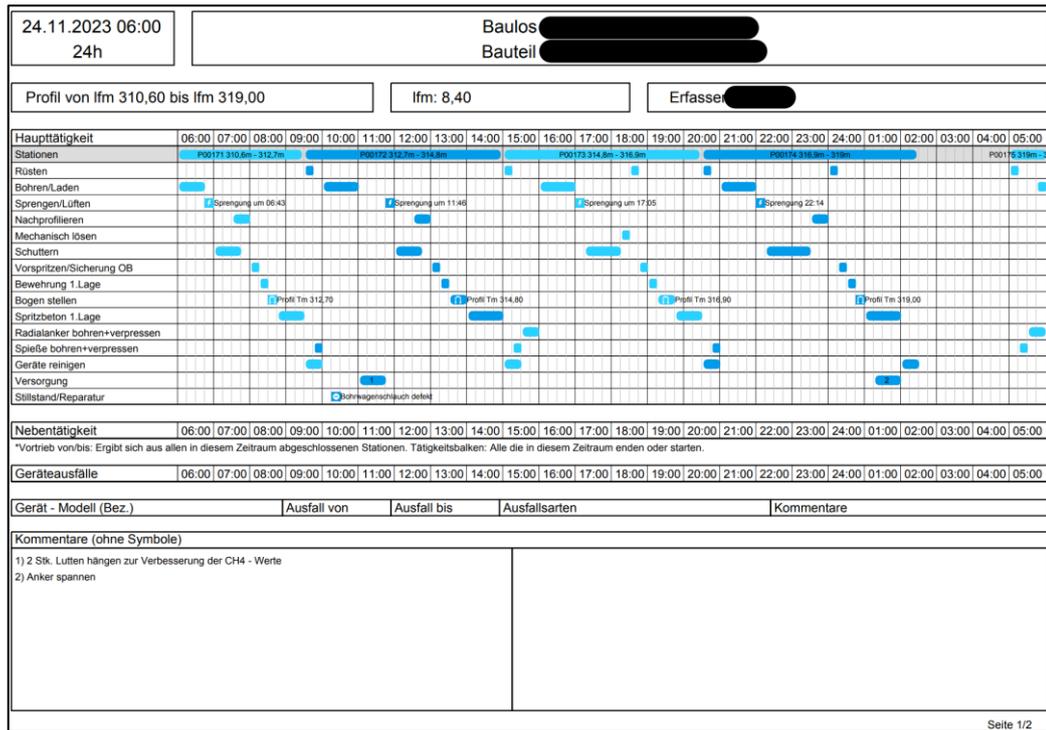


Abbildung 3-3: Zyklusdiagramm 1/2

Auch die Baustoffmengen wie zum Beispiel Sprengmittel oder Spritzbeton werden nachträglich im System erfasst. Der Polier entnimmt sie dem Plan, zum Beispiel bei Anker und Spießen, oder einem Notizblatt für Sprengmittel und Ankermörtel. Protokolle über den Einbau von Stützmitteln werden als Nachweis für die Tunnelstatik geführt und dienen als Grundlage für die Abrechnung. In dem beispielhaft gezeigten Zyklusdiagramm ist das Protokoll auf Seite 2 bereits enthalten, wie in Abbildung 3-4 oben links zu erkennen ist.

Material	P00171	P00172	P00173	P00174	P00175	Summe	Einheit
1. Lage AQ50	3,00	3,00	3,00	3,00		12,00	Stk
Ankermörtel	6,00	5,00	5,00	5,00		21,00	Stk
Zementsäcke 25kg							
Bunch Connector	6,00	6,00	6,00	6,00		24,00	Stk
Gitterbogen 95/20/30	1,00	1,00	1,00	1,00		4,00	Stk
HU Momentenzünder	1,00	1,00	1,00	1,00		4,00	Stk
SN Anker 4m 150kN	6,00	5,00	6,00	5,00		22,00	Stk
Spieß Stabstahl 4m	8,00	8,00	8,00	8,00		32,00	Stk
Sprengmittel	144,48	145,32	143,64	149,52		582,96	kg
Sprengschurmschlaufe	6,00	6,00	6,00	6,00		24,00	Stk
Spritzbeton Laibung ds=20cm	9,00	9,00	9,50	12,50		40,00	m³
Spritzbeton Ortsbrust ds=30cm	2,00	2,00	2,50	2,50		9,00	m³
Systemanschluss P So	20,00	20,00	20,00	20,00		80,00	Stk
Zünder	58,00	56,00	69,00	69,00		252,00	Stk

*Es wird nur Material von Tätigkeiten aufgelistet, die direkt einer Station zugeordnet sind.

Partie von bis	Vorname	Vorname
Gewerbliches Personal	05.00 15.00	15.00 01.00
Mineur	3	4
Polier gewerbl.	1	1
Vorarbeiter gewerbl.	1	1

für den AN:

am 25.11.2023 09:11

Datum, Unterschrift

für den AG/ÖBA:

Datum, Unterschrift

Seite 2/2

Abbildung 3-4: Zyklusdiagramm 2/2

Zusätzlich wird für jeden Abschlag das Abschlagsprotokoll inklusive aller Angaben zum Material ausgefüllt und von beiden Vertragspartnern unterschrieben.

Die Fotodokumentation erfolgt direkt vom Smartphone über einen Upload der Fotos in eine Cloud. Um die Fotos zu einem späteren Zeitpunkt wieder auffinden zu können, werden sie mit entsprechenden Schlagwörtern verortet.

Die GeotechnikerInnen und GeologInnen messen die Fixpunkte täglich, um die Veränderungen des Gebirges und den Einfluss auf die Innenschale zu kontrollieren. Die gemessenen Punkte werden fortlaufend aufgenommen und direkt digitalisiert. Ein Beispiel für die Entwicklung der Verschiebungskomponenten ist in Abbildung 3-5 zu sehen.

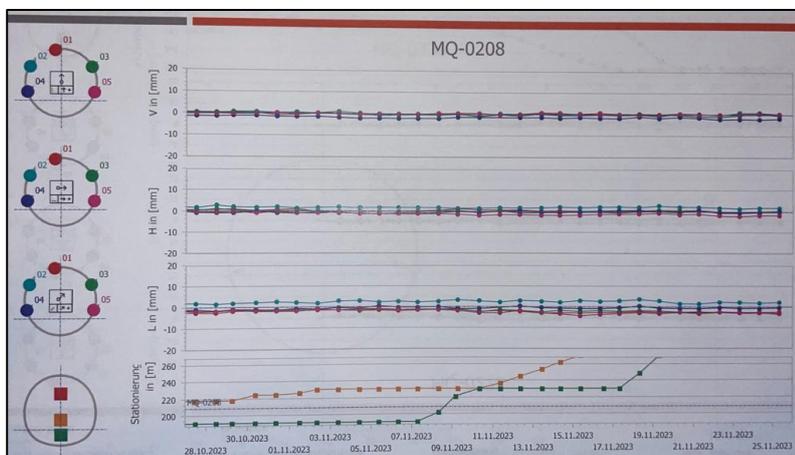


Abbildung 3-5: Graphische Darstellung der Verschiebungskomponenten

Ausbau- und Einbaumassen sowie Materialien werden im Tunnel nicht ermittelt, da es aufgrund des partnerschaftlichen Allianz-Vertrages ausreicht, dass zum Beispiel LKW mit Ausbruchmaterial an der Deponie gewogen und Betonmengen per Lieferschein nachgewiesen werden.

3.1.2.2 Kommunikation

Im Tunnel gibt es eine stabile WLAN-Verbindung. Mobiles Netz ist nur am Tunneleingang vorhanden, daher wird hauptsächlich über das WLAN kommuniziert. Theoretisch könnten somit sämtliche Informationen – wie es bereits mit der Fotodokumentation gehandhabt wird – online über das Internet hochgeladen, weiterverarbeitet und gespeichert werden.

3.1.2.3 Automatisierung / Robotik

Da es sich bei Baustelle A um eine konventionelle Tunnelbaustelle handelt, bedarf es vieler Handgriffe der Mineure. Es existieren für den Sprengvortrieb, wie in Kapitel 2.5.1 erläutert, keine Maschinen wie bei der kontinuierlichen Vortriebsmethode, die den Vortrieb erleichtern und automatisiert laufen. Einzig der Bohrwagen bohrt die Bohrlöcher automatisch, sobald der Polier die Position des Bohrhammers definiert hat. Auf einem Display im Kabinenhaus kann das Sprengmuster zwischen SOLL- und IST-Zustand verglichen werden. Sensoren für die Mengenermittlung sind auf der Baustelle nicht vorhanden. Es wird weder aufgezeichnet wie oft Radlader, LKW oder Betonmischfahrzeuge in den Tunnel ein- und ausfahren, noch werden Transportgewichte gemessen oder Tonnagen ermittelt.

3.1.3 Softwarelösung

Die ausführende Firma arbeitet mit einer internen, selbst entwickelten Software für die Dokumentation des Baustellenbetriebes.

3.1.3.1 Software

Sie besteht aus einer zentralen Datenverwaltung mit einer Datenbankstruktur und funktioniert webbasiert. Das Cloud-System vernetzt die Standorte und Baustellen des Unternehmers und kann im besten Fall über eine Echtzeiterfassung Daten direkt für die nicht auf der Baustelle anwesenden Personen verfügbar machen. Durch die Cross-Browser Kompatibilität, die eine identische Nutzung auf jedem Endgerät ermöglicht, kann – sobald eine stabile Internetverbindung zur Verfügung steht – in jeder Form dokumentiert werden.

Das Programm enthält auf der obersten Ebene mit der Baustellenerfassung, den -stammdaten, der -planung und der -dokumentation vier Anwendungen. Zusätzlich zu den vier Hauptanwendungen können die globalen Module ‚Geräte‘, ‚Material‘, ‚Personen‘,

‚Tätigkeiten‘ und ‚Firmen‘ erfasst werden. An die Nutzer werden unterschiedliche administrative Rechte vergeben. Nach dem Motto ‚nur so viel Zugang wie nötig‘ vermeidet das schlanke Berechtigungsprofil mögliche Überforderungen und sorgt für eine klare vereinheitlichte Struktur. Es gibt dabei zwei Ebenen der administrativen Benutzerrechte: Leserechte (für den AG) und Verwaltungsrechte (für die internen Stabsstellen oder die Bauleitung).

Aus den Informationen, die der Polier täglich einträgt, können über die Anwendung direkt Berichte und Reports der Baustellendokumentation ausgegeben werden. Damit die Poliere direkt nach dem Geschehen dokumentieren, sind Fristen gesetzt. So müssen zum Beispiel die Zyklusdiagramme des jeweiligen Tages bis spätestens 24 Uhr angefertigt sein. Nach dieser Frist kann das Dokument nicht mehr bearbeitet werden. Im Anschluss können die Informationen direkt weiterverwendet und den nachfolgenden Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden. Beispielhaft ist der direkt über die interne Software ausgegebene Bautagesbericht in Abbildung 3-6 dargestellt. [42, S. 47-104]

Bauteil:									
Leistungsstand:		Profil		von lfm: 293,80		bis lfm: 302,20			
Arbeitszeit von:		22.11.2023 06:00		bis:		23.11.2023 06:00		Schichten: 2	
Bauleitung:	Mann:	Gewerbliches Personal:		05:00	15:00	15:00	02:00		
					3		4		
			Mineur						
			Polier gewerbl.		1		1		
			Vorarbeiter gewerbl.		1		1		
Summe:		0,00		Summe:		5		6	
				Gesamtsumme:				11	
Firma:	Tätigkeit:		Kommentar:						
	Vortrieb		Profil Tm 295,90 / Profil Tm 298,00 / Profil Tm 300,10 / Profil Tm 302,20						
Firma:	Geräte:	Anzahl:	Firma:	Geräte:	Anzahl:				
Anmerkungen/Besondere Vorkommnisse: Nachbau Versorgung									
Bauteil:									
Werkstatt									
Arbeitszeit von:		22.11.2023 06:00		bis:		23.11.2023 06:00		Schichten: 2	
Bauleitung:	Mann:	Gewerbliches Personal:		06:00	13:00				
				18:00	01:00				
			Elektriker						
			Magazineur						
			Mechaniker		1				
Summe:		0,00		Summe:		3		1	
				Gesamtsumme:				4	
Firma:	Tätigkeit:		Kommentar:						
	Werkstatttätigkeiten		Meyco Potenza Förderzylinder tauschen und Druckbegrenzungsventil erneuern, Hydrauliköl wechseln, reinigen und E-Heizung für BE-Mitte! installieren; Starthilfe Toyota Landcruiser; Begonnen mit Betonpumpenausbau Epiroc ME3; Durchsicht Baustelle/ GSA; Meyco Potenza Schütz für NOT- Aus Schliefe tauschen, Heizstab verkabeln und anklennen; Stromversorgung für Müllpresse herstellen; Fehlersuche ME3 -> Förderzylinder verlieren Position beim Pumpen-> Zylinder nicht korrekt befestigt						
Firma:	Geräte:	Anzahl:	Firma:	Geräte:	Anzahl:				
	ADR Fahrzeug Ford Transit	1		ME 3, Epiroc ME 3	1				
	Astra Muldenkipper Nr.2 HD-9	1		Manitou 2150 2150 MRT	1				
	Astra Muldenkipper Nr.6 HD-9	1		Meyco Spritzmobil Potenza	1				
	Astra Muldenkipper Nr.7 HD-9	1		Mobiltankstelle Quadro D 1000	1				
	Atlas Copco Bohrwagen E2C	1		Mull Tankfahrzeug TX 10	1				
	Bandschleifer BSM 75	1		Notstromaggregat QAS 500	1				
	Bandsäge Optimum Optimum	1		Reifenwaschanlage Waschanlage	1				

Abbildung 3-6: Ausschnitt des Bautagesberichts

Obwohl sämtliche Daten erfasst und verarbeitet werden findet derzeit noch keine automatisierte Integration in ein TIM-Modell statt. Es existiert zwar ein TIM-Modell, das mit Daten bespielt wird, jedoch wird seitens der ausführenden Firma (noch) kein Nutzen daraus gezogen.

Die GeotechnikerInnen arbeiten mit einer externen Software, wie in Abbildung 3-5 gezeigt.

3.1.3.2 Bereitschaft der MitarbeiterInnen

Bei der Softwareentwicklung wurde von Anfang an Wert auf die Benutzerfreundlichkeit gelegt. Im Fokus jeder EDV-Anwendung sollte der Mensch stehen, denn ohne die Akzeptanz der MitarbeiterInnen, können kaum positive Effekte erzielt werden.

Näheres über die Bereitschaft, die Einstellung zum Programm und den Potenzialen der Software sind bei der Auswertung der Interviews in Abschnitt 4 zu finden.

3.1.3.3 Cybersicherheit

Um eigenständig Daten digital weiterverarbeiten zu können und diese nicht an Dritte weitergeben zu müssen, ist das firmeninterne Programm entstanden. Die Administratoren können genau definieren, wer welche Informationen einsehen oder bearbeiten darf. Das Cloud-System schützt sie vor externen Angriffen.

3.1.4 Auswertung

Die Baustelle A zeigt sich ambitioniert und präsentiert sich fortschrittlich mit einer eigenen Softwarelösung. Aufgrund der benutzerfreundlichen Oberfläche sind die MitarbeiterInnen motiviert, das Programm vollumfänglich zu nutzen. Die Zufriedenheit und die damit einhergehende gute Zusammenarbeit, sowohl intern als auch extern, spiegelt den bisherigen Erfolg der Entwicklung einer eigenen Lösung wider. Dennoch sind weitere Potenziale vorhanden, wie zum Beispiel:

- Die Graphen der GeotechnikerInnen müssten nicht ausgedruckt, sondern könnten bei einer Verwendung von Tablets auf der Baustelle direkt digital unterzeichnet werden.
- Da der Polier nur im Nachhinein, meist am Ende eines Tages, das Zyklusdiagramm anhand der Uhrzeiten seiner Fotos anfertigt, kann es bei der Datenerfassung zu Ungenauigkeiten oder Fehlern kommen. Es sollte abgewogen werden, ob der Umstieg auf eine Smartphone- oder Tablet-Dokumentation vor Ort sinnvoll wäre.

Sehr positiv zu bewerten ist die digitale Unterschrift. Die Vertragspartner sparen sich damit nicht nur Papier, sondern auch Zeit und Platz im Bauleitungscontainer. Da die Protokolle online unterzeichnet und in der Datenbank abgelegt werden, sind keine weiteren Arbeitsabläufe notwendig.

3.2 Baustelle B

Bei Baustelle B geht es um eine mit Tunnelbohrmaschinen betriebene Baustelle für einen ca. 20 km langen Versorgungstunnel. Da von zwei Seiten vorgetrieben wird, kommen zwei Doppelschild-TBM zum Einsatz. Die Maschinen sind jeweils 300 Meter lang und haben einen Durchmesser von 5,2 Meter. Der Tunnel soll innerhalb von sechs Jahren fertig gestellt sein. Ein multinationaler Großkonzern, der vor allem im konventionellen Tunnelbau viele Großprojekte erfolgreich abgeschlossen hat, führt den Auftrag aus.

3.2.1 Allgemeiner Überblick

Gearbeitet wird 24 Stunden am Tag, außer an Sonntagen. Die Tagschicht arbeitet beginnend am Montagmorgen um 6 Uhr bis jeweils abends 18 Uhr, nur samstags geht die Schicht bereits um 14.30 Uhr zu Ende. Die Nachtschicht startet jeweils um 18 Uhr und endet am nächsten Morgen um 6 Uhr. Auch hier mit der Ausnahme, dass die Schicht samstags bereits um 14.30 Uhr beginnt und nur bis 20 Uhr gearbeitet wird. Anschließend erfolgt eine Pause der Vortriebsarbeiten bis Montag früh. Ausgenommen von der Pause sind die Wartungsarbeiten, die idealerweise während des Stillstands der Maschinen durchgeführt werden können. Die Schichten bestehen jeweils aus mindestens 16 MitarbeiterInnen, darunter jeweils ein Schichtführer sowie eine Person aus der Schichtbauleitung, die die Verantwortung für den Vortrieb im Tunnel tragen. Den Kontakt zum Bauherrn hält der Tunnelingenieur aus dem Büro. Er kooperiert direkt mit dem TBM-Manager, der sich um den laufenden Betrieb der Tunnelbohrmaschinen kümmert. Beide werden mit digitalen Informationen aus dem Tunnel versorgt. An den Schnittstellen zwischen Tag- und Nachtschicht sorgt der Schichtleiter für die Informationsweitergabe. In der Regel ist er mit der Tagschicht im Tunnel anzutreffen, er koordiniert jedoch beide Schichten. Sowohl der Vermesser als auch die Geologin befinden sich nur bei Bedarf im Tunnel.

Eine besondere Herausforderung dieses Projektes sind Sprachbarrieren. Der Anteil ausländischer MitarbeiterInnen ist sehr hoch, daher wird meistens Englisch gesprochen. Da einige Beteiligte nicht gut Englisch sprechen, leidet die Kommunikation dementsprechend.

3.2.1.1 Baustellenstruktur

Die Struktur dieser Baustelle ist sehr komplex, da der Tunnel von zwei Seiten aus vorgetrieben und an vielen weiteren Orten gleichzeitig gearbeitet wird. Überall müssen wesentliche Informationen erkannt und dokumentiert werden. Die Aufgaben sind vielseitig, die Arbeitsabläufe anspruchsvoll und die Gegebenheiten sehr beengt. Zudem findet alle 12 Stunden ein Schichtwechsel statt und die Experten bestimmter Fachgebiete wechseln je nach Bedarf zwischen den beiden Vortriebsseiten.

Die Titel der Verantwortlichen (Tunnelingenieur, TBM-Manager, SchichtingenieurIn, Schichtführer, Schichtleiter) klingen allesamt sehr ähnlich, dennoch ist sich jeder der eigenen

Aufgaben bewusst. Unter Einhaltung der hohen Standards hinsichtlich Qualität und Arbeitssicherheit wird das durchschnittliche Tagesziel an Vortriebsleistung in der Regel erreicht, da die Zusammenarbeit im Team funktioniert.

3.2.1.2 Zuständigkeiten & Aufgabenteilung

Die Zuständigkeiten für die Dokumentation auf der Baustelle B sind in der folgenden Tabelle 3-2 dargestellt. Firma B besitzt weder eine eigene Dokumentationssoftware noch Geräte, um die Dokumentation direkt digital zu erfassen. Die Mineure erfassen sämtliche Daten zu ihren ausgeführten Arbeiten auf den ausgedruckten, vorgefertigten Tabellen analog. Anschließend sammelt die Schichtbauleitung diese Protokolle ein und digitalisiert sie im Büro auf der TBM.

Mineure	Schichtbauleitung	Tunnelingenieur
<ul style="list-style-type: none"> Maschinenfahrer: analoges Zyklusdiagramm, analoges Protokoll der Probebohrungen, analoges Protokoll der Maschinendaten 	<ul style="list-style-type: none"> Digitalisierung aller vorher analog erfassten Daten sowie digitale Dokumentation besonderer Ereignisse in firmeninternem Bautagebuch 	<ul style="list-style-type: none"> Überprüfung der Tagesberichte
<ul style="list-style-type: none"> Ringbauer: Protokoll über Abstandsmessung zwischen Ring und Schild 	<ul style="list-style-type: none"> Anfertigung des Tagesberichts 	<ul style="list-style-type: none"> Koordinierung und Freigabe an Bauherren
<ul style="list-style-type: none"> Hinterfüller: Protokoll über Hinterfüllung mit Kies/Mörtel 	<ul style="list-style-type: none"> Stundenerfassung externes Personal 	<ul style="list-style-type: none"> Rücklaufeinforderung
<ul style="list-style-type: none"> Mechaniker/Elektriker: Wartungsprotokoll 		

Tabelle 3-2: Zuständigkeiten bei Baustelle B

3.2.2 Digitalisierung

Das Thema ‚Digitalisierung‘ ist dem Auftragnehmer von Baustelle B nicht neu. In den vergangenen Jahren ist bereits viel Geld in die App-Entwicklung investiert worden, sodass die MitarbeiterInnen sich zum Beispiel über eine ID-App ausweisen können. Unterschiedlichste Softwarelösungen wurden vor allem für den konventionellen Tunnelbau bereits erarbeitet. Da

die Firma jedoch noch nicht so viele Projekte im maschinellen Tunnelbau ausgeführt hat, wurden vor Projektbeginn noch keine großen Innovationen entwickelt.

3.2.2.1 Was wird dokumentiert?

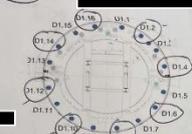
Die Auflistung der für die Dokumentation der Baustellenprozesse nötigen Protokolle erfolgt parallel zum Vortriebszyklus, beginnend mit den Probebohrungen im vorderen Teil und abschließend mit dem Protokoll zur Hinterfüllung im hinteren Teil der TBM. Da es sich um wasserführendes Gestein handelt, werden Sondierlöcher mit einer Tiefe von 40 Metern gebohrt. Tritt mehr als eine festgelegte Menge Wasser pro Zeiteinheit aus, werden Injektionen vorgenommen, um einen Dichtschirm herzustellen. Tritt weniger Wasser aus als der Grenzwert es erlaubt, kann die TBM weitere 27 Meter bohren. Danach folgen die nächsten Probebohrungen. Dokumentiert wird, alle 3 bis 4 laufenden Meter, wie groß die Vortriebsgeschwindigkeit des Bohrers bei gleichbleibender Kraft ist. Zudem wird überprüft, wie viel Wasser austritt. Die Standardinformationen über die durchführende Person, Start- und Endzeit sowie die Angabe zum exakten Ort runden das in Abbildung 3-7 dargestellte Protokoll ab.

Probe holes
40m

DRILLING REPORT

Date: 07/12/2023
 Face Chainage: 3176,66
 Drill starting chainage: 3168,89
 Shift eng.:
 Shift/Drill Operator:

Signature:
Signature:



Nr.	Start / End	5m	8m	11m	14m	17m	20m	23m	26m	29m	32m	36m	40m	L/min
8	15:40 16:12	0,4 collon	2,2	2,3	2,2	2,5	2,0	1,9	1,7	1,6	1,7	1,6	1,7	0,2
Comment: 16:14													Number of packers: 1	Drilled length: 40m
Driller: 16:22														
6	16:25 16:57	0,4 collon	2,2	2,7	2,2	1,7	1,9	1,9	1,7	1,4	1,7	1,7	1,6	0,2
Comment: 16:59													Number of packers: 1	Drilled length: 40m
Driller: 17:09														
4	17:12 18:26	collon 2,2	2,2	2,1	2,4	2,0	1,9	2,3	2,0	1,5	1,7	1,8	1,8	0,2
Comment: 18:27/18:34													Number of packers: 1	Drilled length: 40
Driller:														
2	18:35 19:08	collon 2,2	2,4	2,3	2,4	2,5	2,2	2,3	2,3	1,8	1,9	1,9	1,6	0,2
Comment: 19:09/19:17													Number of packers: 1	Drilled length: 40
Driller:														

Abbildung 3-7: Protokoll zu den Probebohrungen

Im nächsten Schritt kann die TBM den Vortrieb fortsetzen. Im Steuerstand wird die Maschine vom Maschinenfahrer gesteuert und je nach geologischen Bedingungen schneller oder langsamer gefahren. Dies geschieht unter Verwendung des in Abbildung 3-8 auf der linken Seite abgebildeten Monitors. Im Hintergrund werden diese Informationen durch die Software des Maschinenherstellers gespeichert und somit der Schichtbauleitung sowie dem Auftraggeber nahezu in Echtzeit online zur Verfügung gestellt. Für die doppelte Datensicherung schreibt der Fahrer, wie auf der rechten Seite gezeigt, die wichtigsten Informationen, z.B. die Abweichung von der Sollposition, die Schubkraft, das Drehmoment oder die Umdrehungen pro Minute, mit.

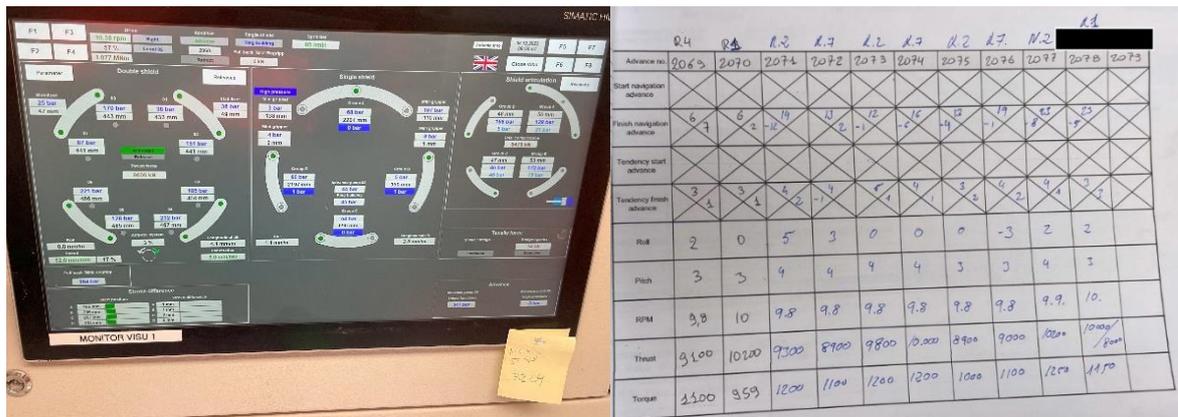


Abbildung 3-8: Maschinendaten

Parallel zu dem digital mitlaufenden Protokoll fertigt der Maschinenfahrer ein weiteres Protokoll mit dem selben Informationsgehalt für die firmeninternen Unterlagen von Hand an. Alle 5 Minuten wird ein Kästchen in der vorgefertigten Tabelle ausgefüllt. Da sich ein Zyklus bei einer Doppelschild-TBM im Idealfall aus dem Vortrieb der TBM, gefolgt vom parallel dazu stattfindenden Ringbau sowie dem Umsetzen der Gripper zusammensetzt, sind primär die in Abbildung 3-9 gezeigten obersten drei Zeilen auszufüllen. Im Falle von Störungen, wie in diesem Beispiel im dritten Zyklus, sind die Kästchen der dafür verantwortlichen Ursache ab der 4. Zeile auszufüllen. Sollte es zu besonderen Ereignissen kommen, können diese in dem unterhalb der Tabelle vorgesehenen Feld notiert werden.

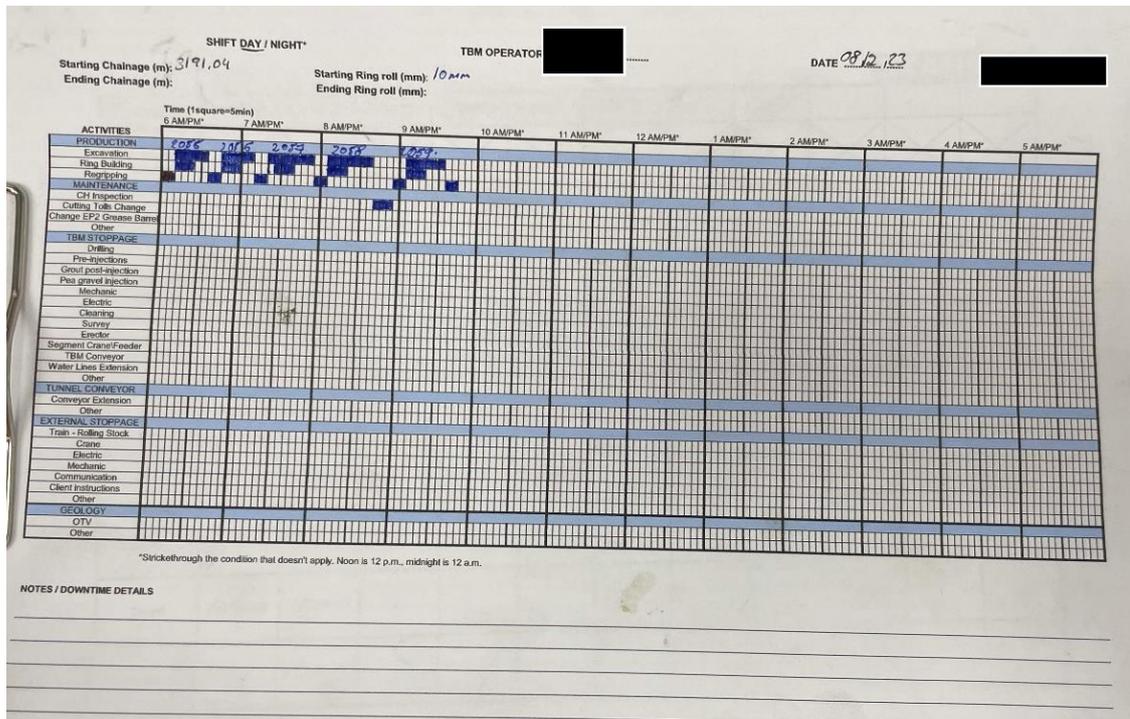


Abbildung 3-9: Zyklusdiagramm

Da die TBM-Software auf dieser Baustelle keine Angabe für den Grund der Störung ermöglicht, werden digital nur die Stillstandzeiten festgehalten. Am Ende jeden Tages wird ein Bautagesbericht angefertigt. In diesem werden die analogen Informationen des Maschinenfahrers digitalisiert.

Darüber hinaus werden Informationen über die Abstände des Tübbingrings zum Schild, Hinterfüllungsarbeiten und Wartungsarbeiten zur Absicherung protokolliert. In Abbildung 3-10 ist der Notizblock zu sehen, auf dem die vier gemessenen Abstände der Tübbinge (oben, unten, links und rechts) aufgeschrieben werden. Mit diesen Daten geht der Ringbauer ins Fahrerhaus und lässt sich die Positionen der Tübbinge für die richtige Lage des nächsten Rings errechnen. Im Fall von Ring Nummer 2.035, wo der Abstand oben zum Beispiel 350 Millimeter beträgt, wird die Anordnung Nummer 2 aus den vorher angefertigten Standard-Anordnungen des Tübbingherstellers gewählt.

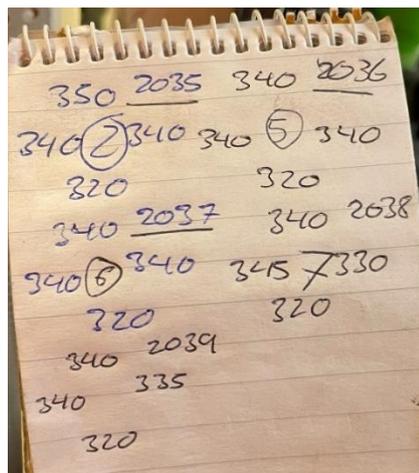


Abbildung 3-10: Protokoll über Abstandsmessung zwischen Ring und Schild

Da die spätere Überprüfung der vollständigen Hinterfüllung des Hohlraumes zwischen Tunnelaußenschale und Gebirge mit einem großen Aufwand verbunden ist, wird auch hier protokolliert, welche Elemente hinterfüllt sind. Neben dem genauen Ort der Einbringung werden die Menge, der Druck sowie die Vollständigkeit notiert, siehe Abbildung 3-11.

Backfilling Grout Injection

Inj. number:	Shift ing.:	TOT Cement (kg)
Date: 21/12/2023	Operator:	TOT Additives (kg)
Start time: 06:00	Stop time:	TOT Other (kg)

Ring Number	Position	Line	Liters	Pressure (bar)	Grout check	Drainage holes	Comment
1869	8	1	13595				INJECTED
1844	11	2	2342	6			INJECTED
1846	11						CONNECTION
1839	3						FULL
1841	3						FULL
1892	5						CONNECTION
1843	3						FULL
1845	3						FULL
1846	3						FULL
1851	3						FULL
1853	3						FULL
1855	3						FULL
1843	1	2	937	6			INJECTED
1845	1						CONNECTION
1846	11						FULL
1863	10						FULL
1864	9						FULL
1865	10						FULL
1866	8						FULL
1867	10						FULL

Abbildung 3-11: Protokoll über Hinterfüllung mit Kies bzw. Mörtel

MAINTENANCE SERVICE

DATE: 07/12/2023

TBM NUMBER: 51220A

INTERVAL	COMPONENT	MAINTENANCE WORK AND CHECK	REMARKS	NAME	SIGNATURE	COMMENT
STEEL STRUCTURE						
DAY	Entire steel structure	Check: Platforms, handrails, links, running gear, steel structures in general Clean if necessary	OK	Bj Row	##	
	Machine frame	Check: Condition Clean if necessary	OK	"	"	
CUTTER HEAD						
Before each new ring	Entire cutterhead	Check: Condition	Immediate repair in case of damage			
DAY	Structure, disc cutters, disc cutter fixtures, buckets, cutting tools wear protection	Check: Condition, wear, firm seating of disc cutter and bucket fixtures, temperature. Clean as needed	Replacement if required			
	Muck Ring	Check: Condition Clean as needed	Immediate repair in case of damage	"	##	
	Sprinkling (water)	Check: Function Clean as needed	Immediate repair in case of damage	"	"	
	Entire cutterhead	Cleaning	Immediate repair in case of damage	"	"	
SHIELD						
DAY	Steel components, platforms, railings	Check: Condition (e.g. welds) Clean as needed	Immediate repair in case of damage	"	##	
	All Cylinders	Check: Condition, all Hydraulic connections	Immediate repair in case of damage	"	"	
	Hydraulic system: Hoses, lines, connections, distributor	Check: Condition, tightness, chafe marks. Clean as needed	OK	"	##	
MAIN DRIVE						
DAY	Steel components	Check: Condition Clean as needed	Immediate repair in case of damage	"	##	
	Hydraulic system: Hoses, lines, connections, distributor	Check: Condition, tightness, chafe marks. Clean as needed	OK	"	##	

Abbildung 3-12: Wartungsprotokoll

Um einen störungsfreien Betrieb der Tunnelbohrmaschinen zu gewährleisten, werden regelmäßige Wartungsarbeiten durchgeführt. Auch hier ist die Dokumentation hauptsächlich zur eigenen Absicherung bei späteren Kontrollen durch den Auftraggeber gedacht. Es wird in einer vorgefertigten Tabelle, wie in Abbildung 3-12 gezeigt, festgehalten ob - und wenn ja welche - Probleme mit zum Beispiel den Meißeln, der Hydraulik oder den Bohrern auftreten.

Zudem wird eine Fotodokumentation der Geologin angefertigt, die nach Bedarf die Ortsbrust besichtigt. Sie fotografiert das Gestein und verarbeitet die Informationen später im Büro außerhalb des Tunnels.

3.2.2.2 Kommunikation

Die Kommunikation im Tunnel erfolgt über direkte, persönliche Gespräche und tragbare Funkgeräte. Der Kontakt zur Bauleitung außerhalb des Tunnels wird über Microsoft Teams abgewickelt, da überall im Tunnel eine stabile WLAN-Verbindung besteht.

3.2.2.3 Automatisierung / Robotik

Auf den TBM erfolgen einige Prozesse automatisiert. Durch die im Hintergrund mitlaufende Aufzeichnung der Maschinendaten, wie Geschwindigkeit, Druck oder Drehmoment, kann von überall auf der Welt nahezu in Echtzeit verfolgt werden, wie die Bohrarbeiten fortschreiten. Die meisten handwerklichen Prozesse, wie zum Beispiel die Dokumentation der Probebohrungen oder Abstandsmessungen von Tübbingring und Schild, sind jedoch nicht automatisiert und werden dementsprechend auch nicht automatisch aufgezeichnet.

3.2.3 Softwarelösung

Im ausführenden Unternehmen ist keine firmeninterne Software für TBM vorhanden, sodass auf die Software des Maschinenherstellers in Kombination mit der Dokumentation des Bautagebuches über MS OneNote und MS Excel gesetzt wird.

3.2.3.1 Software

In dem Programm des Tunnelbohrmaschinenherstellers stehen alle wesentlichen Maschinendaten zur Verfügung. Am Ende des Tages kann ebenfalls ein Schichtbericht angefertigt werden. Für genauere Details müssen die Gründe für den jeweiligen Stillstand nachträglich manuell eingetragen werden, da diese Daten noch nicht mit aufgenommen werden. Die Sensoren geben lediglich Aufschluss darüber, ob die Maschine fährt oder nicht. Tagesberichte werden nicht mit der Software erstellt, weil es nicht möglich ist, eigene Graphiken zu gestalten oder sie anzupassen. Eine Kopplung an ein TIM-Modell ist nicht vorhanden.

3.2.3.2 Bereitschaft der MitarbeiterInnen

Die Bereitschaft der MitarbeiterInnen ist vorhanden, anstatt Stift und Papier ein Tablet oder ein Smartphone zu verwenden. Da auf der Baustelle B viele administrative Prozesse bereits über verschiedene Apps abgewickelt werden, sind die MitarbeiterInnen gewohnt mit elektronischen Hilfsmitteln zu arbeiten und sich mit neuen Benutzeroberflächen zu beschäftigen.

3.2.3.3 Cybersicherheit

Die Sicherheitsrisiken sind eher gering, da keine globalen Vernetzungen bestehen. Für die TBM-Software wurden Zugriffsrechte an bestimmte Personen vergeben. Ansonsten wird hauptsächlich mit MS Office Anwendungen gearbeitet. Die Daten werden vertraulich behandelt und die abgeschlossenen Dokumente in eine firmeneigene Cloud hochgeladen.

3.2.4 Auswertung

Die Digitalisierung auf Baustelle B ist hinsichtlich der Dokumentation noch ausbaufähig. Unabhängig davon, ob eine Standardsoftware oder ein eigenes Produkt genutzt wird, könnten Ressourcen (Zeit, Geld, Papier, etc.) gespart, Übertragungsfehler vermieden und Prozesse optimiert werden. Da alles auf Papier festgehalten wird, der Wunsch nach einer digitalen Ablage aber dennoch besteht, ist die Bauleitung nahezu die gesamte Arbeitszeit mit dem ‚händischen‘ Digitalisieren beschäftigt. Durch eine direkte Übertragung der Daten in eine Datenbank könnte die Bauleitung ihre ersparte Arbeitszeit anderweitig einsetzen.

Die doppelte Datenführung der Tunnelbohrmaschine ist zu hinterfragen. Die Software nimmt ohnehin sämtliche Daten auf und speichert sie ab, sodass sie jederzeit abrufbar sind. Auch hier könnten Ressourcen gespart und Arbeitsprozesse beschleunigt werden. Über eine Nutzung der Zusatztools aus der Software des TBM-Herstellers könnten die Daten visuell aufbereitet und damit besser auswertbar werden. Der Maschinenführer könnte anstelle seiner analogen Protokollführung direkt Art und Dauer von Störungen in der Software eintragen. Übertragungsfehler wären somit reduziert oder ganz eliminiert.

Zu guter Letzt könnten mehrere Prozesse automatisierter ablaufen. Beispielsweise durch den Einsatz von Lasern bei der Distanzmessung oder Sensoren bei den Probebohrungen, die die gewünschten Daten beim Bohren automatisch aufzeichnen, könnten weitere Fehlerquellen ausgeschlossen werden.

3.3 Baustelle C

Bei dem dritten Tunnelprojekt handelt es sich um einen Eisenbahntunnel bestehend aus zwei Röhren mit einem Durchmesser von jeweils 10,4 Metern. Das Projekt wird von einer ARGE, bestehend aus zwei großen Baukonzernen mit viel Erfahrung im Tunnelbau, ausgeführt. Die Bauzeit soll 80 Monate betragen. Das betrachtete Teilstück wird mit einer Einfachschild-TBM vorgetrieben. Die Länge der Maschine beträgt 150 Meter.

3.3.1 Allgemeiner Überblick

Die TBM ist durchgängig mit zwölf Beschäftigten besetzt und es wird sieben Tage die Woche rund um die Uhr gearbeitet. Die Wartungsschicht unterbricht den Vortrieb an jedem Morgen von 7 bis 9 Uhr. Die GeologInnen nutzen den Stillstand, um die Ortsbrustaufnahmen anzufertigen. Die Vortriebsarbeiten erfolgen in den verbleibenden 22 Stunden im

Zweischichtenbetrieb. Alle sechs bzw. acht Tage wechselt das gesamte Personal (8/6-Dekade). Der Polier ist die im Tunnel verantwortliche Person und arbeitet eng mit dem Bauleiter, der zwischen Büro und Baustelle pendelt, zusammen. Der Bauleiter hält den Kontakt zum Bauherrn und übergibt die Bautagesberichte. Zwei Mal täglich treffen sich die Poliere der Tag- bzw. Nachtschicht mit dem Bauleiter, um die wichtigsten Informationen auszutauschen und die in Papierform vorliegenden Protokolle weiterzugeben.

3.3.1.1 Baustellenstruktur

Auf der Baustelle gibt es klare Strukturen, die in Organigrammen für alle Beschäftigten gut nachvollziehbar dargestellt sind. Hierarchieebenen, Verantwortlichkeiten und Positionsbezeichnungen sind klar definiert. Die Wege innerhalb der TBM sind aufgrund der geringen Gesamtlänge der Maschine kurz. Die Koordination der nachlaufenden Arbeiten ist aufgrund des großen Tunnelquerschnitts unproblematisch. Dem Tagesziel, einer vorab definierten Vortriebsleistung, wird alles Weitere untergeordnet. Die vorrangige Sprache auf der Baustelle ist Deutsch, mit ausländischen Leiharbeitern wird auf Englisch kommuniziert.

3.3.1.2 Zuständigkeiten & Aufgabenteilung

Die Zuständigkeiten sind auf der Baustelle klar festgelegt. Alle an der Dokumentation beteiligten Personen wissen genau, was in welcher Form zu protokollieren ist. Es wird weder mit einem Tablet noch mit dem Handy dokumentiert. Ein Scangerät zur Identifikation der Tübbingringe ist das Einzige, das die Daten automatisch an die Dokumentationssoftware weiterleitet. Alles weitere wird in vorgefertigten, ausgedruckten Tabellen handschriftlich ausgefüllt. Da mit dem Bauherrn eine digitale Dokumentation vereinbart wurde, übertragen Polier und Bauleiter Berichte und Protokolle händisch in die EDV. Aufteilung und Art der Dokumentation ist Tabelle 3-3 zu entnehmen.

Mineure	Polier	Bauleiter	Auftraggeber
<ul style="list-style-type: none"> Maschinenfahrer: analoges Zyklusdiagramm 	<ul style="list-style-type: none"> Digitalisierung des Sehnenlängenmessungs- und Frischmörtelprüfungsprotokolls 	<ul style="list-style-type: none"> Digitalisierung des Meißelwartungsprotokolls und nachträgliche Bearbeitung des Zyklusdiagramms 	<ul style="list-style-type: none"> Schadstellenprotokoll
<ul style="list-style-type: none"> Ringbauer: analoges Ringbauprotokoll (Schildschwanzluft & Segmente), analoges Meißelwartungsprotokoll, analoges Sehnenlängenmessungsprotokoll 	<ul style="list-style-type: none"> Digitales Ringbauprotokoll (über Scan automatisch erfasst), Stundenerfassung des Personals in Excel 	<ul style="list-style-type: none"> Anfertigung des zus. digitalen Tagesberichts (bleibt beim AG im Anschluss), Kontrolle & Ablage sämtlicher analoger Protokolle 	<ul style="list-style-type: none"> Spalt- und Versatzmaßprotokoll

<ul style="list-style-type: none"> Hinterfüller: analoges Frischmörtelprüfungsprotokoll, analoges Abstichmaßprotokoll (wird nicht digitalisiert, aber vom Polier unterschrieben) 	<ul style="list-style-type: none"> Analoge Felddaufmaßblätter (zum Beispiel Bettungsverbesserung) 	<ul style="list-style-type: none"> Kontakt zum Bauherrn: Koordination und Freigabe inklusive Rücklauf-einforderung, Einscannen der unterschriebenen Schichtberichte 	
<ul style="list-style-type: none"> Schlosser: analoges Fettverbrauchsprotokoll 			

Tabelle 3-3: Zuständigkeiten bei Baustelle C

3.3.2 Digitalisierung

3.3.2.1 Was wird dokumentiert?

Beginnend beim Vortrieb dokumentiert in erster Linie der Maschinenfahrer zusätzlich zur automatisch aufzeichnenden Software des Tunnelbohrmaschinenherstellers die Geschehnisse in Form eines handgeschriebenen Zyklusdiagramms. Obwohl über Sensoren die Zeit für Vortrieb und Ringbau aufgezeichnet wird, kann die Software nur über die dementsprechende ‚Down-time‘ Auskunft geben, nicht jedoch den Grund für die Stillstände ermitteln bzw. angeben. Über festgelegte Codes kann der Maschinenfahrer Ursachen und Verantwortlichkeiten für Ausfälle einfach dokumentieren. So kann die ausführende Firma im Nachgang Mehrkosten berechnen, sollte die Sphäre beim Auftraggeber liegen. Das Zyklusdiagramm mit 5 Minuten Intervallen und der Möglichkeit zusätzliche Bemerkungen zu notieren, ist links in Abbildung 3-13 dargestellt.



Abbildung 3-13: Zyklusdiagramme (analog vs. digital)

Dieses vertragsrelevante Dokument wird vom Bauleiter kontrolliert und selbst in die EDV eingepflegt (siehe Abbildung 3-13, rechte Seite). Er muss die Daten im Büro übertragen, da für einen Computer kein Platz in der Fahrerkabine ist und eine mobile Version nicht existiert.

Ähnlich läuft es mit dem Meißelwartungsprotokoll ab. Der Ringbauer nimmt täglich die gemessenen Werte der Meißel, insgesamt sind es 62 Stück, für die Abnutzung in [mm] handschriftlich in einer Tabelle mit Bemerkungen auf. Im Falle eines notwendigen Austausches werden die jeweiligen Bezeichnungen und die bereits vorhandene Abnutzung des neu eingebauten Meißels notiert. Die Tabelle wird wiederum vom Bauleiter im Büro in die EDV eingepflegt. Des Weiteren notiert der Ringbauer die Nummern der verbauten Tübbinge pro Ring in einer Tabelle (siehe Abbildung 3-14, rechte Seite), sowie die per Hand gemessene Schildschwanzluft auf einem Notizblock.

Die Tübbinge werden liegend mit einem Zug zur Einbaustelle transportiert. Jeder Tübbing ist sowohl stirnseitig als auch auf der Innenseite mit einem QR-Code, der ID, dem Segmenttypen sowie den wichtigsten Informationen wie Betontyp, Gewicht und Betonierdatum versehen. Der Logistiker scannt den QR-Code und erhält Informationen, welche Tübbinge für den nächsten Ring vorgesehen sind. Zudem kann jeder Tübbing im eingebauten Zustand identifiziert werden. Die gescannten Elemente werden von einem Zusatztool der TBM-Software erfasst und mit den händisch nachgetragenen Schildschwanzluftabständen in einem Protokoll zusammengefasst, wie auf der linken Seite in Abbildung 3-14 zu erkennen ist. Das Ringbauprotokoll wird zur Sicherheit doppelt geführt und durch das auf der rechten Seite abgebildete handschriftliche Dokument abgesichert. Im Nachgang digitalisiert der Polier das analoge Protokoll.

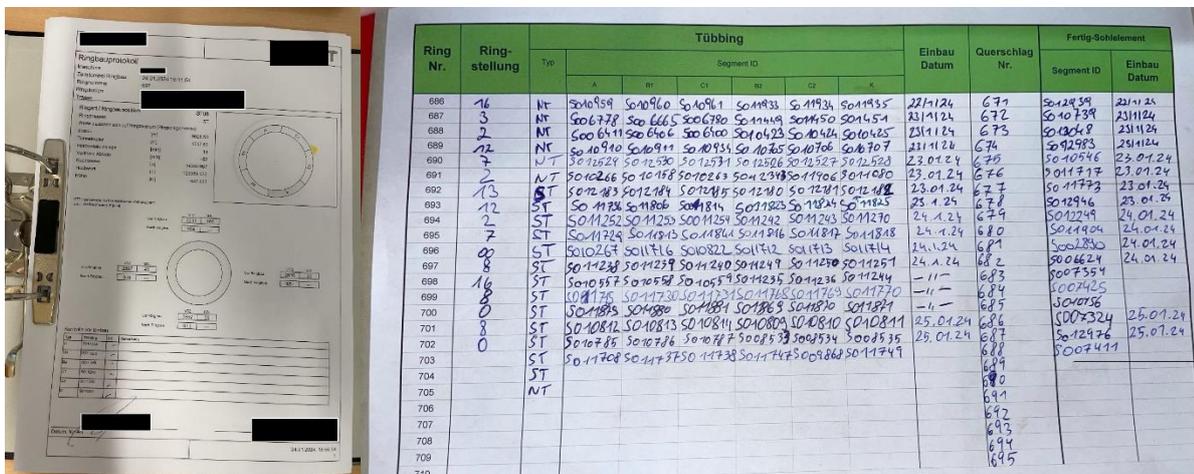


Abbildung 3-14: Digitales vs. analoges Ringbauprotokoll

Zu guter Letzt trägt der Ringbauer die gemessenen Sehnenlängen ein. Auch hier liegt eine ausgedruckte Tabelle vor, sodass der Ringbauer nur noch per Hand die Werte in die vorgesehenen Felder eintragen muss, siehe Abbildung 3-14. Zur Überwachung der Ringverformung wird nach der Fertigstellung des Rings und nach dem Einbau der darauffolgenden sechs Ringe jeweils einmal gemessen. Über die auf dem Protokoll obenstehenden Warn- und Alarmwerte kann direkt verglichen werden, ob die Verformungen in Ordnung sind oder nicht. Sind die Messungen abgeschlossen, tippt der Polier die Werte ab.

Ring Nr.		Typ	Nullmessung (Umrissmaß nach Einbau)		Folgemessung (Nominalmaße)							Änderung	Sehnenlänge Absolut		Status Grenzwerte		
NT/ST/QT	Datum	Uhrzeit	Absolutmaß (mm)	Nominalmaß (mm)	1	2	3	4	5	6	7	(mm)	NT	ST	QT		
676	21.01.24	04:30	5818	5818	5820	5822	5824	5826	5828	5830	5832	-	#WERT!	#####	###		
677	21.01.24	05:40	5824	5824	5826	5828	5830	5832	5834	5836	5838	-	#WERT!	#####	###		
678	21.01.24	08:10	5817	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	5831	-	#WERT!	#####	###		
679	21.01.24	10:30	5817	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	5831	-	#WERT!	#####	###		
680	21.01.24	12:00	5817	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	5831	-	#WERT!	#####	###		
681	22.01.24	06:30	5818	5818	5820	5822	5824	5826	5828	5830	5832	-	#WERT!	#####	###		
682	22.01.24	08:10	5815	5815	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	-	#WERT!	#####	###		
683	22.01.24	11:45	5817	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	5831	-	#WERT!	#####	###		
684	22.01.24	16:25	5815	5815	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	-	#WERT!	#####	###		
685	22.01.24	19:50	5817	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	5831	-	#WERT!	#####	###		
686	22.01.24	21:50	5818	5818	5820	5822	5824	5826	5828	5830	5832	-	#WERT!	#####	###		
687	23.01.24	00:28	5817	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	5831	-	#WERT!	#####	###		
688	23.01.24	02:00	5815	5815	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	-	#WERT!	#####	###		
689	23.01.24	04:15	5817	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	5831	-	#WERT!	#####	###		
690	23.01.24	05:45	5818	5818	5820	5822	5824	5826	5828	5830	5832	-	#WERT!	#####	###		
691	23.01.24	08:20	5818	5818	5820	5822	5824	5826	5828	5830	5832	-	#WERT!	#####	###		
692	23.01.24	09:25	5818	5818	5820	5822	5824	5826	5828	5830	5832	-	#WERT!	#####	###		
693	23.01.24	10:15	5818	5818	5820	5822	5824	5826	5828	5830	5832	-	#WERT!	#####	###		
694	24.01.24	05:15	5815	5815	5817	5819	5821	5823	5825	5827	5829	-	#WERT!	#####	###		
695	24.01.24	06:10	5825	5825	5827	5829	5831	5833	5835	5837	5839	-	#WERT!	#####	###		
696	24.01.24	08:20	5820	5820	5822	5824	5826	5828	5830	5832	5834	-	#WERT!	#####	###		
697	24.01.24	10:00	5825	5825	5827	5829	5831	5833	5835	5837	5839	-	#WERT!	#####	###		
698	24.01.24	10:20	5824	5824	5826	5828	5830	5832	5834	5836	5838	-	#WERT!	#####	###		
699	25.01.24	07:30	5824	5824	5826	5828	5830	5832	5834	5836	5838	-	#WERT!	#####	###		
700	25.01.24	09:30	5824	5824	5826	5828	5830	5832	5834	5836	5838	-	#WERT!	#####	###		
701	25.01.24	10:15	5825	5825	5827	5829	5831	5833	5835	5837	5839	-	#WERT!	#####	###		
702	25.01.24	15:15	5823	5823	5825	5827	5829	5831	5833	5835	5837	-	#WERT!	#####	###		
703	NT											-	#WERT!	#####	###		
704	NT											-	#WERT!	#####	###		
705	NT											-	#WERT!	#####	###		
706	NT											-	#WERT!	#####	###		

Abbildung 3-15: Sehnenlängenmessungsprotokoll

Das Fettverbrauchsprotokoll wird vom Schlosser geführt. In einer Tabelle sind die Hübe untereinander durchnummeriert. Zu jeder Vortriebsnummer wird in [cm] angegeben, wie sich der Füllstand verändert und wie hoch er nach der Durchführung ist. Wird das Fass gewechselt, ist das Datum zu vermerken. Auch hier wird alles analog dokumentiert, mit dem Unterschied, dass der Fettverbrauch lediglich für die eigene Abrechnung aufgenommen und deshalb nicht digitalisiert wird.

Sind die Tübinge eines Rings eingebaut, erfolgt die Hinterfüllung bzw. Bettung durch den ‚Kieser‘ und den ‚Mörtler‘. Damit die richtigen Maßnahmen getroffen werden können, ist zunächst das Abstichmaß, der Abstand zwischen Tübinginnenkante und dahinterliegendem Gestein, zu messen. Liegt nichts an der Außenschale an, wird der Abstand zum Gebirge gemessen und notiert, siehe Abbildung 3-16. Die Kürzel K für ‚Kies‘, M für ‚Mörtel‘ und VK für ‚Verklast‘ geben Aufschluss über die vorgefundene Art der Hinterfüllung. Das Protokoll sieht Spalten für 10 Ringe vor, da mit zwei Meter breiten Tübbingungen und einem Tagesziel von 18 Metern (9 Ringe/Tag) im Durchschnitt täglich ein Formular nahezu gefüllt wird. Stimmen die Vertragspartner zu, wird es von beiden unterschrieben und ohne Digitalisierung abgeheftet.

Abstichmaße Ringspalt HT-OS																				
Datum:		Tagschicht			Nachtschicht			Schematische Skizze:												
25.01.24		X			X			Ansicht in VTR Achse Ring links 1 1 rechts 2 2 Abstichmaß t Stülpmaß Hülse												
Nr. Öffnung	Ring Nr.		Ring Nr.		Ring Nr.		Ring Nr.		Ring Nr.		Ring Nr.		Ring Nr.		Ring Nr.		Ring Nr.			
	l	r	l	r	l	r	l	r	l	r	l	r	l	r	l	r	l	r		
	t [cm]		t [cm]		t [cm]		t [cm]		t [cm]		t [cm]		t [cm]		t [cm]		t [cm]			
1	80	78	82	79	80	78	81	80	80	78	74	76	76	81	77	80	78	79	73	79
2	73	67	70	68	69	67	77	76	77	76	77	71	74	76	77	72	77	71	74	72
3	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
4	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
5	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
6	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M

Abbildung 3-16: Abstichmaßprotokoll

Der ‚Mörtler‘ ist zuständig für die Frischmörtelprüfung, wobei er durch den Polier unterstützt wird. In der Regel wird wie oben gezeigt im unteren Viertel des Rings (Vergleiche ‚Nr. Öffnung 6‘) Mörtel eingebracht. Oberhalb ist Perlkies über die bestehenden Öffnungen im Tübbing als Hinterfüllung vorgesehen. Das Protokoll enthält die folgenden Daten: den Namen des Prüfers, das Datum, den Prüfzeitpunkt, die Temperatur, das Ausbreitmaß, die Rohdichte sowie den Luftporengehalt. Es wird zunächst auf einem Notizblatt notiert und später im Büro in eine Excel-Tabelle übernommen. Dieses Dokument ist nur für die eigene Archivierung vorgesehen und wird nach dem Ausdruck abgeheftet.

Bei besonderen Ereignissen, zum Beispiel bei einer Verklauung, wird vom Standardzyklus abgewichen und der Auftragnehmer hat ggf. Anspruch auf eine zusätzliche Vergütung. Nicht nur für die Abrechnung, sondern auch für eine vollständige Dokumentation des Bauablaufes ist es von Bedeutung, wo zum Beispiel Anker eingebracht und Ringe verpresst werden. In Abbildung 3-17 ist die Excel-Tabelle eines beispielhaften Feldaufmaßblattes zu sehen, auf der Ort und Mengenangaben zu dem verbauten Material zu finden sind. Auch das wird zunächst auf einem Notizblock festgehalten und später abgetippt, ausgedruckt, unterschrieben, für den Bauherrn kopiert, wieder eingescannt und in der Cloud gespeichert.

FELDAUFMASSBLATT

HT-059 ZM 8 - Radiale Bohrungen zur Bettungsverbesserung

Ausführungsdatum	
Von	Bis
03.12.2023	04.12.2023

LV-Positionen

01 05 750901A Selbstbohranker L=1,5 m 13,50 [m]

01 05 750901B Verpress-/Injektionsgut 7,62 [m]

Verpresste Ringe

Ring	Verblasöffnung													
	Nr.	UB	06.00	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6
499	0							X	X	X				
500	0							X	X					
501	0							X	X					
502	0							X	X					
503	0							X	X					

VTR ↑

Anmerkung: X = gebohrt / X = nicht zugänglich

IBO Muffen R32 Stück

Kreuzkronen R32 Stück

Hilf - Hil - Hy200-A Stück

Hilf - HKV M16x55 Stück

Dezember 2023

Abbildung 3-17: Feldaufmaßblatt

Der Polier trägt in diesem Falle die Verantwortung. Auch Ortsbrustaufnahmen im Falle einer einfallenden Ortsbrust sowie Wasserzutritten oder Anschläge bei Querschlägen werden über Feldaufmaßblätter seitens des AG angeordnet und vom Polier bestätigt. Darüber hinaus ist er für die Erfassung der Arbeitsstunden des Tunnelpersonals zuständig. In der in der Cloud liegenden Excel-Tabelle trägt er am Ende einer jeden Schicht ein, wer wie lange gearbeitet hat.

Da der Schichtbericht jeweils nur die einzelne Schicht darstellt, wird zusätzlich noch ein Bautagesbericht, wie in Abbildung 3-18 gezeigt, ausgestellt. Hier trägt die Bauleitung die vom Polier aufgezeichneten Stunden sowie sonstige Informationen ein. Dieses Dokument verbleibt nach Unterzeichnung beim AG, weil es nur als Formalität gilt und die wichtigen, für den Vortrieb entscheidenden, Informationen bereits im Schichtbericht enthalten sind.

BAUTAGESBERICHT												NR.: 319						
Baustelle	[REDACTED]											am	Dienstag, 23.01.2024					
Wetter:	bewölkt											bewölkt						
Temperatur:	08:00	-3°C									12:00	3°C	17:00	bewölkt	-1°C			
	Personalaufstellung											Geräte						
	Bauplätze	Schichtbauleiter/Techniker	Bauführer	Polier	Meister	Hilfsarbeiter	Griffhilfen / VA	Minerale / FA (incl. QS)	Schlosser / Mechaniker	Elektriker	Legelager	Zusätzl. Fachz. ZM, SM	SADA	AGC Montierung (Montabbing)	Supervisor HK	Mitarbeiter HK	SONSTIGES	Geräte
Vortrieb HT						1												
Logistik OT UT																		
BE-UT																		
Allg. Einrichtung	1	2	1	2	1													
Messstüßling																		
Querschlag																		
Allgemein:																		
Tägliche Wartung Förderbandanlage [REDACTED]																		
Eingeschränkter Förderbandbetrieb aufgrund offener losübergreifender Schnittstellenthematik bezüglich geschlossener Abförderkette																		
Ausfälle Förderbandanlage [REDACTED] siehe Maschinenberichte																		
Vortriebe																		
HT-05 - TVM1																		
Vortriebe gem. Maschinenbericht																		
HT-05 - TV02																		
Vortriebe gem. Maschinenbericht																		
Querschläge																		
Vortrieb bzw. diverse Arbeiten (gem. Schichtdiagramm)																		
QS 18 Ost: Vortrieb von TM 55,93 bis 61,03																		
QS 18 West: Keine Tätigkeiten																		
Sonstiges: Dieser Bautagesbericht gilt auch als Dokumentation!																		
Viele Personalausfälle zufolge Krankheit (speziell HT-05)																		

Abbildung 3-18: Bautagesbericht

Das Schadstellenprotokoll für beschädigte Tübbinge wird vom Bauherrn ausgefüllt. Mithilfe von hinzugefügten Fotos und einer Verortung wird ein Ausdruck generiert, der in der Folge von beiden Vertragspartnern unterschrieben wird, wie in Abbildung 3-19 (links) dargestellt. Das Protokoll wird kopiert und abgelegt. Rechts in der Abbildung ist das Spalt- und Versatzmaßprotokoll zu sehen. Die nebeneinander eingebauten Tübbinge dürfen gewisse Grenzwerte hinsichtlich des Spaltmaßes und des Fugenversatzes nicht überschreiten, sodass der Umfang innen eine saubere, glatte Oberfläche darstellt. Es werden sowohl die Längs- als auch die Ringfugen überprüft. Unterschreiten die Messungen den Grenzwert, wird dies mit einem Haken vermerkt. Anschließend muss auch das Dokument von AN und AG unterschrieben werden.

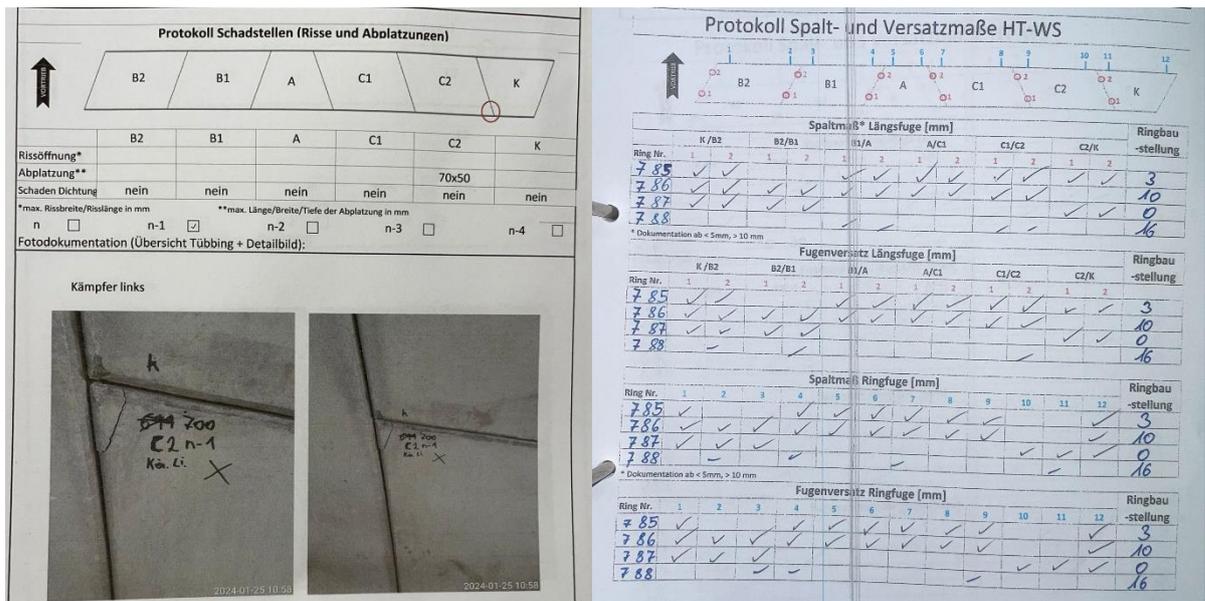


Abbildung 3-19: Schadstellen- (li.) sowie Spalt- und Versatzmaßprotokoll (re.)

Ferner dokumentieren auch die GeologInnen die tatsächlichen geologischen Verhältnisse im Tunnel, jeweils einmal am Tag. Primär wird über Ortsbrustscans und Fotos der jeweilige Stand festgehalten. Da es im Bohrkopf durch die beengten Verhältnisse nicht anders möglich ist, werden wie in Abbildung 3-20 (links) gezeigt auf einem Notizblatt weitere Informationen festgehalten und später am Laptop im Büro digitalisiert. Die GeologInnen prägen sich ihre im Tunnel erlebten Eindrücke zu den Trennflächen, dem Gebirge und dem Bergwasser ein und erarbeiten sich die restlichen für den baueologischen Bericht notwendigen Informationen anhand der Scans und den Fotos (vgl. Abbildung 3-20 (rechts)).

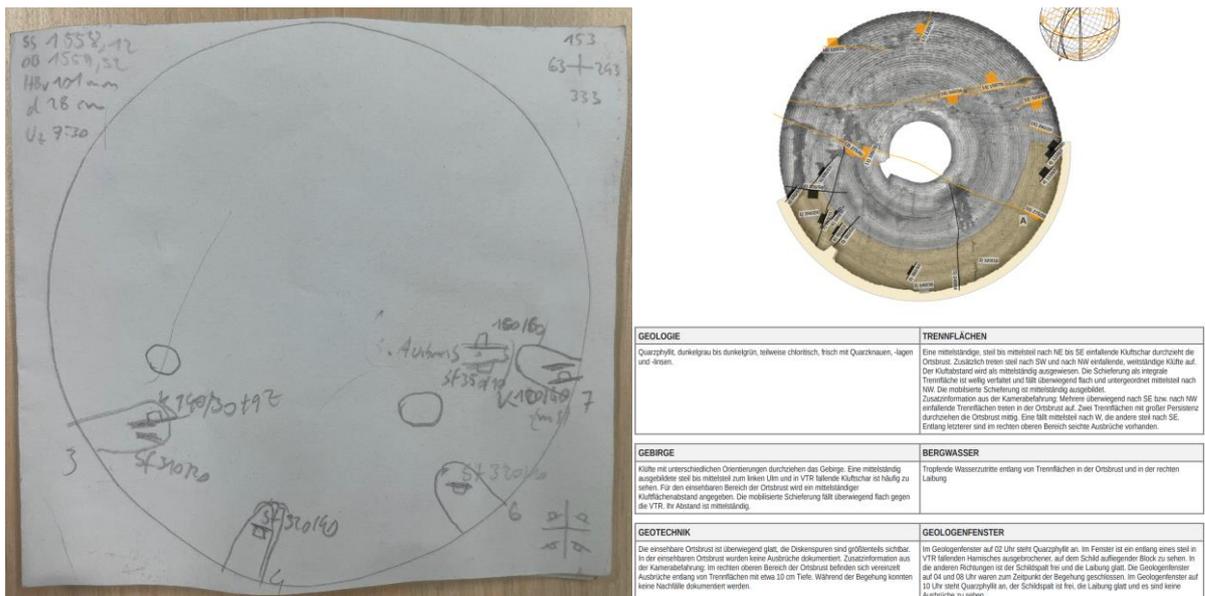


Abbildung 3-20: Ortsbrustaufnahme (li.) und baueologisches Protokoll (re.)

3.3.2.2 Kommunikation

Die Kommunikation im Tunnel erfolgt über tragbare Funkgeräte. Darüber hinaus kann auf das Mobilfunknetz zugegriffen werden, da neben WLAN eine stabile Netzverbindung aufrechterhalten wird. Der Teil der Daten, der über Sensoren automatisch generiert wird, kann sofort über das WLAN hochgeladen werden. Die händisch aufgenommenen Informationen werden, wie in Kapitel 3.3.2.1 erläutert, in Papierform übergeben.

3.3.2.3 Automatisierung / Robotik

Der Hersteller der TBM ist derselbe wie derjenige auf Baustelle B, es handelt sich lediglich um einen anderen Maschinentypen. Da die Prozesse sehr ähnlich sind, können sie Kapitel 3.2.2.3 entnommen werden. Die Dokumentation ist hinsichtlich der Scans der Tübbing-IDs sowie der Aufnahme der Ortsbrust mit einem Laserscanner-System automatisiert. Darüber hinaus ist für handwerkliche Arbeitsschritte jedoch keine automatische Aufzeichnung der Daten über Sensoren vorgesehen. Alle Informationen müssen zunächst abgetippt oder in Papierform übergeben werden.

3.3.3 Softwarelösung

Es ist keine firmeninterne Software für die Dokumentation der Baustellenprozesse vorhanden. Aus wirtschaftlichen Gründen hat sich die ausführende ARGE für die Software des Tunnelbohrmaschinenherstellers und dessen Zusatztools entschieden.

3.3.3.1 Software

Die Software nutzt Power BI, eine Analysesoftware von Microsoft, im Hintergrund, um die ermittelten Daten detailliert graphisch darzustellen und so eine bessere Auswertung der TBM-Daten zu ermöglichen. So ist zum Beispiel über Kreisdiagramme in jedem Schichtbericht sofort erkennbar, wie viel Prozent der Gesamtzeit vorgetrieben wurde. Die Daten können in eine externe Datenbank exportiert und anderweitig weiterverwendet werden. Zur Unterstützung der Programme wird Microsoft Excel und OneNote für die über die Sensoren hinausgehende Dokumentation verwendet. Die GeologInnen arbeiten ebenfalls mit einer externen Software, eine Datenplattform in der Cloud. Der Berichtsgenerator erstellt mit Eingabe der Daten automatisch die baugelogeische Dokumentation in übersichtlicher Art und Weise. Auch hier ist eine individuelle Anpassung der Darstellungen möglich.

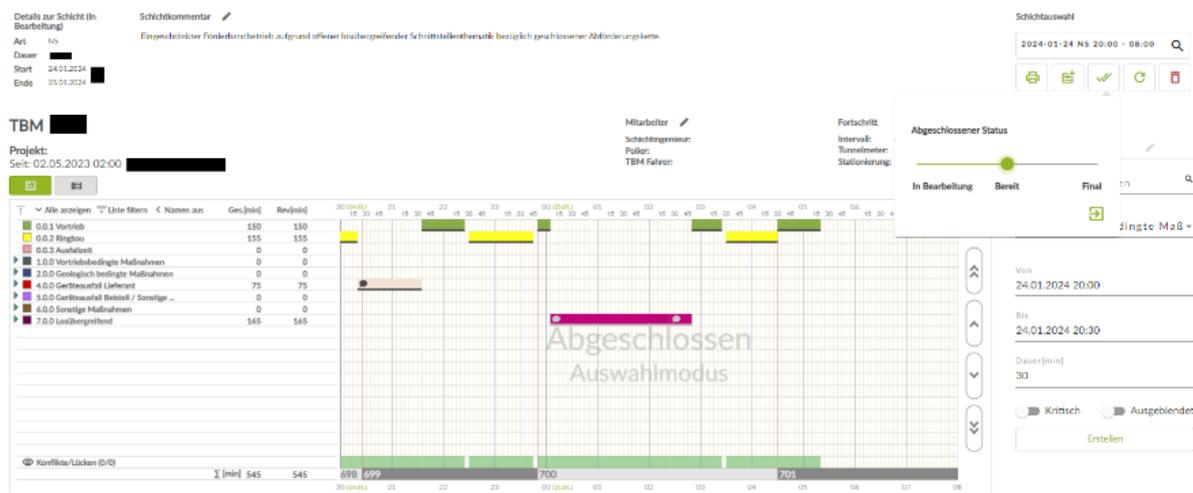


Abbildung 3-21: Schichtdiagramm des Bauleiters

Über Lese- und Bearbeitungsrechte bieten die Programme zudem die Möglichkeit, allen Beteiligten Einblicke nahezu in Echtzeit zu geben. Mit den Status ‚in Bearbeitung‘, ‚Bereit‘ und ‚Final‘ aus Abbildung 3-21 weiß der Bauleiter, wie weit der Schichtbericht bearbeitet wurde. Mithilfe der vorher definierten Berechtigungen können die für den jeweiligen Schritt verantwortlichen Personen ihre Aufgaben erledigen. Das Zusatztool für den Ringbau wird nur intern benutzt, um die eigene Dokumentation zu vereinfachen. Hierbei ist keine Echtzeit-Verfolgung von extern möglich.

3.3.3.2 Bereitschaft der MitarbeiterInnen

Die MitarbeiterInnen sind bereits geschult, die Daten in Papierform über Excel direkt im Polierbüro zu digitalisieren. Sie sind zudem bereit, anstelle von Stift und Papier mit Apps auf dem Smartphone oder Tablet die Daten digital zu erfassen. Da es ihnen das teilweise komplizierte Übertragen ersparen würde und sie damit mehr Zeit für andere Arbeiten hätten, würde das TBM-Personal eine Einführung einer Dokumentationssoftware befürworten, sofern sie gut eingearbeitet werden.

3.3.3.3 Cybersicherheit

Hinsichtlich der Sicherheit der Daten läuft es auf Baustelle C identisch ab wie in 3.2.3.3 beschrieben.

3.3.4 Auswertung

Baustelle C unterliegt einem sehr hohen Bürokratieaufwand. Sogar bei der Sicherheitsunterweisung, bevor man den Tunnel überhaupt betreten darf, ist dies bereits spürbar: Vier unterschiedliche ausgedruckte Protokolle müssen vor dem Zugang zum Tunnel unterschrieben werden. Allein dafür existieren somit vier Ordner im Baubüro. Ein großes Regal mit fünf Regalebenen und diversen Ordnern wird für die Dokumentation benötigt. Nicht selten

werden die Protokolle drei- oder vierfach geführt, wie zum Beispiel der Schichtbericht. Er wird vom Maschinenfahrer handschriftlich angefertigt, vom Polier übergeben, durch den Bauleiter digitalisiert und erneut ausgedruckt, vom AG unterschrieben und kopiert, um zu guter Letzt wieder eingescannt zu werden. Ein Dokument, was täglich zwei Mal entsteht (Tag- und Nachtschicht) wird somit zwei Mal analog und zwei Mal digital abgelegt. Mit einer digitalen Unterschriftenlösung könnten sowohl Papier als auch weitere Ressourcen geschont werden.

Die Entscheidung für die Software des Maschinenherstellers ist aufgrund wirtschaftlicher Aspekte gefallen. Obwohl der Anbieter versucht über den Kundenservice die gewünschten Daten möglichst effektiv und gut visuell aufbereitet auszugeben, kann das Programm nicht allumfassend die gewünschten Protokolle in ausreichender Genauigkeit anbieten.

Für das Schadstellenprotokoll könnte man mit einer App wie beim Hochbau Tickets erstellen und diese online verschicken. Nach Beseitigung des Mangels kann der AN dann online bestätigen, dass es ordnungsgemäß wiederhergestellt wurde und ggf. ein Foto hinzufügen. Letztlich kann der AG dann ‚grünes Licht‘ geben und den Vorgang damit beenden oder eine erneute Korrektur aussenden.

Die Frage der Notwendigkeit stellt sich bei einigen Protokollen: Muss die Sehnenlängenmessung durchgeführt werden? Falls ja, sind die Handmessungen im Millimeterbereich bei einem Abstand von fünf Metern, das korrekte Eintragen der dazugehörigen Messung auf dem Papier, das Digitalisieren der analogen Daten und die darauffolgende Auswertung nicht viel zu fehlerbehaftet? Dasselbe gilt für das mehrfachgeführte Ringbauprotokoll: Aus negativen Erfahrungen in der Vergangenheit wird dem Barcodescan nicht vertraut und alles zusätzlich per Hand doppelt ausgeführt. Es gilt zu hinterfragen, ob eine genaue Ringzuweisung und eine direkte Überprüfung am ersten, automatisch erzeugten Ringbauprotokoll nicht effektiver sind, als das zusätzliche ‚Back-up-Dokument‘ zu führen.

3.4 Unterschiede / Besonderheiten der Vortriebsarten

In dieser Masterarbeit wurden insgesamt drei Tunnelbaustellen besucht, darunter eine konventionell und zwei maschinell vorgetriebene. Aufgrund der begrenzten Anzahl besuchter Baustellen ist eine umfassende Pauschalisierung der Auswertung nicht möglich. Dennoch bieten die Ergebnisse bereits einen tiefen Einblick in den gegenwärtigen Stand der Digitalisierung im Allgemeinen. Da jedoch Tunnelprojekte in unterschiedlichen europäischen Ländern mit einem hohen technischen Standard besucht wurden, lässt sich vermuten, dass die Gegebenheiten auch auf weiteren Tunnelbaustellen ähnlich sind. Die Unterschiede zwischen beiden Vortriebsweisen in Bezug auf die Dokumentationsweise der Unternehmen und den

Stand der Digitalisierung sowie die Besonderheiten sind in Tabelle 3-4 herausgearbeitet. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Einfluss der Unternehmen sowie deren Arbeitsweise erheblich ist.

Konventioneller Vortrieb	Maschineller Vortrieb
<p>Dokumentation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geringer Dokumentationsaufwand: Es wird nur das Nötigste aufgeschrieben. In der Regel: <ol style="list-style-type: none"> 1) Zyklusdiagramm 2) Stützmittelprotokoll 3) Fotodokumentation • 15 Minuten Intervalle im Zyklusdiagramm 	<p>Dokumentation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Großer Dokumentationsaufwand, nicht nur wegen automatischer Erzeugung von Daten durch Sensoren. In der Regel: <ol style="list-style-type: none"> 1) Zyklusdiagramm 2) Ringbauprotokoll 3) Frischmörtelprüfung 4) Hinterfüllung 5) Spalt- und Versatzmaß 6) Probebohrungsprotokoll • 5 Minuten-Intervalle im Zyklusdiagramm
<p>Digitalisierung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fotodokumentation direkt im Tunnel • Sämtliche Daten müssen selbst notiert werden • Digitale Unterschrift möglich • Keine Mehrfachführung und Mehrfacharchivierung • Sehr wenig Papier auf der Baustelle 	<p>Digitalisierung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensoren der Maschinen generieren viele Daten automatisch • Analoge Unterschrift auf Papier • Zwei- bis drei, oder vierfachgeführte Dokumente aufgrund einer fehlenden Online-Plattform mit Leserechten für den AG • Extrem viel Papier auf der Baustelle
<p>Softwarelösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eigene Entwicklung, um unabhängig zu sein und eigene Wünsche verwirklichen zu können 	<p>Softwarelösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einkauf von externer Dienstleistung: Meist Softwarelösung des Maschinenherstellers
<p>Personal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sprechen i. d. R. gleiche Sprache • Bereitschaft für digitales Arbeiten vorhanden • Schichten arbeiten 20 Stunden pro Tag 	<p>Personal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mehrere, unterschiedliche Sprachen • Bereitschaft für digitales Arbeiten vorhanden • Schichten arbeiten 24 Stunden pro Tag

Tabelle 3-4: Unterschiede / Besonderheiten

Die großen Unterschiede zwischen konventionellem und maschinelltem Tunnelbau waren so nicht zu erwarten, auch wenn einige Punkte wie zum Beispiel die digitale Unterschrift und die Menge an Dokumenten abhängig vom Vertragsmodell und nicht von der Vortriebsmethode sind. Obwohl die TBM durch ihre Sensoren elektronische Daten erzeugt und die Automatisierung deutlich weiter fortgeschritten ist als im zyklischen Vortrieb, wird nicht mit digitalen Endgeräten gearbeitet. Bei hellen und saubereren Arbeitsbedingungen in der Maschine wäre die Verwendung von Tablets sehr gut möglich. Auf der konventionellen Baustelle A wird zwar ebenfalls nicht mit Tablets gearbeitet, die Organisation ist durch direkte digitale Eingaben und digitale Fotodokumentationen deutlich fortschrittlicher.

3.5 Vergleich der Baustellen

Alle drei Tunnelbaustellen sind Unikate und die Dokumentation ist individuell festgelegt worden. Die Anforderungen an Form, Art, Speicherung und Weitergabe von Informationen sind insbesondere abhängig von der Art des Vortriebs, der Länge und dem Durchmesser der Röhre, dem Personaleinsatz, den geologischen Gegebenheiten und den vertraglichen Vereinbarungen mit dem Bauherrn.

Die Unterschiede zwischen Baustelle A (konventioneller Tunnelbau) sowie den Baustellen B und C (maschineller Tunnelbau) sind Tabelle 3-4 zu entnehmen. Die Baustellen B und C mit der gleichen Vortriebsart ähneln sich. Sie nutzen beide die Software des Maschinenherstellers und führen die Art der Dokumentation nahezu identisch aus: Es wird immer zunächst alles in vorgefertigten Tabellen händisch notiert und anschließend am Computer digitalisiert. Beide Baustellen beschäftigen dadurch mindestens eine Person beinahe in Vollzeit mit dem Abtippen der analogen Informationen und riskieren Übertragungsfehler. Baustelle C unterscheidet sich von Baustelle B in der Menge der Protokolle. Der Bürokratieaufwand ist deutlich höher, da einige Dokumente mehrfach geführt werden (z. B. Ringbauprotokoll) oder zusätzliche Messungen festgehalten werden (z. B. Sehnenlängenmessungsprotokoll). Weitere Abweichungen sind aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten vorhanden. Bei Baustelle B handelt es sich um wasserführendes Gebirge, das die Notwendigkeit von Probebohrungen nach sich zieht. Bei Baustelle C hingegen kann es durch Verkläusungen durch einfallendes Gebirge zu speziellen Maßnahmen hinsichtlich der Bettung des Tübbingrings kommen.

Der Auftraggeber besitzt auf allen Baustellen die Leserechte der verwendeten Software und hat damit Einblicke in den Vortrieb nahezu in Echtzeit. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Vertrauen gegenüber dem Vertragspartner deutlich wächst, wenn die Berichterstattung über den Fortschritt der Baustelle realitätsnah erfolgt. Eine weitere Gemeinsamkeit aller Baustellen ist, dass kein Nutzen aus einem digitalen Modell gezogen wird. Obwohl es bereits Ansätze auf

Baustelle A und C gibt, handelt es sich bei der Anwendung von Tunnel-Information-Modeling nur um Pilotprojekte, bei denen die ausführende Firma nicht direkt beteiligt ist. Die in Kapitel 2.3 genannten Potenziale, die eine Verortung der Informationen für die laufende Dokumentation und auch für den späteren Betrieb mit sich bringt, werden derzeit noch nicht ausgeschöpft. Alle Projekte sind weit entfernt von der papierlosen Baustelle.

4 Interviews

Für die Beantwortung der Forschungsfragen werden unterstützend zu dem standardisierten Bewertungsbogen aus Kapitel 3 die für die Dokumentation verantwortlichen Personen auf den Baustellen zur Digitalisierung im Tunnelbau interviewt. Zu Beginn erfolgt ein kurzer Einblick in den Stand der Forschung zur Durchführung von Interviews. Aufbauend auf der Erklärung der Durchführung von Interviews erfolgt die Auswertung mithilfe der Software MAXQDA. Abschließend werden die Ergebnisse tabellarisch sowie visuell dargestellt und interpretiert.

4.1 Stand der Forschung zur Durchführung von Interviews

Im deutschsprachigen Raum zählt die qualitative Inhaltsanalyse zu einer der am häufigsten angewendeten Methode der Auswertung von Kommunikationsmaterial. Es handelt sich dabei immer um nicht standardisierte Daten. Eine kleine, nicht repräsentative Stichprobe wird untersucht, um Einblicke in Entscheidungskriterien und die Motivationsstruktur zu bekommen. Neben Philipp Mayring werden auch die Ansätze von Udo Kuckartz und Margrit Schreier in der Literatur erwähnt. Alle Ansätze haben das gleiche Ziel: Über eine Strukturierung soll das Material gegenstandsgemäß zusammengefasst und der vorhandene Inhalt somit bestmöglich analysiert werden. [43, S. 36]

Die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring sieht zu Beginn wissenschaftlichen Vorgehens immer qualitative Schritte vor. Zunächst wird die Forschungsfrage definiert, darauf folgt die Erarbeitung eines Kategoriensystems. Die Kategorien sind das zentrale Element der Analyse und sorgen für die nötigen Gütekriterien: Reliabilität und Validität (vergleiche Kapitel 4.4). Im Anschluss kann die Methode durch quantitative Analyseschritte ergänzt werden. [44, S. 21-51]

Bevor die Interviews durchgeführt werden, muss die Form der Analyse geklärt werden. Es kann zwischen der zusammenfassenden, der explizierenden und der strukturierenden Inhaltsanalyse ausgewählt werden. Auch Mischformen sind möglich. Wenn nur die inhaltliche Ebene von Interesse ist, kann für die strukturierende Inhaltsanalyse das zur Verfügung stehende Material zusammengefasst werden. Mit vorher festgelegten Ordnungskriterien (Codierleitfaden) wird im Anschluss gefiltert. Die Kategorienbildung erfolgt dabei deduktiv vor der Anfertigung des Interviewleitfadens, da das Forschungsthema bekannt ist und der Forscher weiß, in welche Richtung er das Interview leitet. Es wird vom Allgemeinen ausgehend ins Detail gearbeitet. Bei der induktiven Kategorienbildung ist das Vorgehen umgekehrt. Die Kategorien werden bei der

zusammenfassenden Inhaltsanalyse direkt aus dem Textmaterial der transkribierten Dateien vom Feinen ins Allgemeine erstellt. [44, S. 67]

Für diese Arbeit eignen sich demnach beide Mischformen: die zusammenfassend-strukturierende Inhaltsanalyse in Kombination mit dem induktiv-deduktivem Kategoriensystem. Das Interview wird bewusst gesteuert, dennoch ist der Autor offen für das Neue und Unbekannte.

4.2 Transkription der Interviews

Zunächst werden die Interviews transkribiert. ‚Transkribieren‘ (lat. *transcribere*) bedeutet ‚Umschreiben‘. Das Umschreiben geht folglich immer mit einer Informationsreduktion einher. Das Transkript soll auf der einen Seite das Interview bestmöglich repräsentieren, auf der anderen Seite für den Leser komprimiert und gegenstandsangemessen aufbereitet sein. Die Transkription kann sowohl ‚einfach‘ oder ‚erweitert‘ nach den Transkriptionsregeln von Dresing und Pehl als auch komplex nach den Transkriptionsregeln ‚GAT2‘ (Abkürzung für Gesprächsanalytisches Transkriptionssystem 2) durchgeführt werden. Im Tunnelbau ist die Bedeutung des gesprochenen Wortes wichtig, es geht also nur um den semantischen Inhalt. Der Dialekt sowie die Umgangssprache können geglättet werden, es werden keine para- (z. B. laut oder leise) oder nonverbalen (Mimik und Gestik) Ereignisse dargestellt. Demnach ist die einfache Transkription der Baustelleninterviews mit den Transkriptionsregeln nach Dresing und Pehl absolut ausreichend. [43, S. 16-23]

Es kommt kein Transkriptionsprogramm zum Einsatz, die Interviews werden alle durch den Autor persönlich verschriftlicht. Wie in Kapitel 4.1 erläutert, dürfen bei der Durchführung einer zusammenfassenden Inhaltsanhaltenalyse nach Mayring die Antworten auf das Wesentliche gekürzt werden, um zu den Kernaussagen zu gelangen. Im Nachgang haben die Interviewpartner die in Anhang 7.5 befindliche Freigabebestätigung unterzeichnet und sich mit der Transkription einverstanden erklärt.

4.3 Qualitative Inhaltsanalyse

Die Auswertung der Interviews erfolgt nach dem Ablaufschema von Kuckartz, das in Abbildung 4-1 dargestellt ist. Es ergänzt damit das allgemeine inhaltsanalytische Ablaufmodell von Mayring und legt den Fokus besonders auf die Rückkopplungsschleifen in der Festlegung der (Sub-) Kategorien sowie deren Definitionen. [44, S. 62]

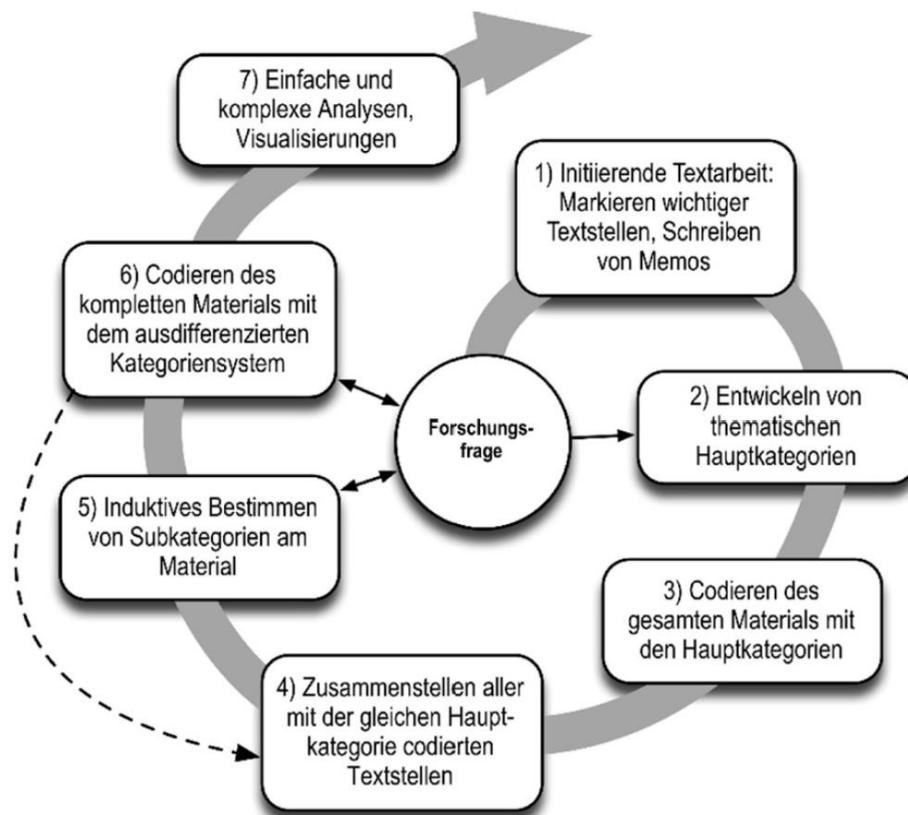


Abbildung 4-1: Ablaufschema nach Kuckartz [45, S. 100]

Die sieben Schritte des Ablaufschemas der inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse werden für diese Arbeit analog ausgeführt. Nach der Definition der zentralen Forschungsfrage, beginnt die Analyse der transkribierten Interviews mit der initiierenden Textarbeit. Erste Ideen werden gesammelt und notiert, wichtige Stellen markiert und Inhalte zusammengefasst. Mit Festlegung der Forschungsfrage wurde der Kodierleitfaden vorab deduktiv in der Theorie vorbereitet (siehe Pfeilrichtung in Abbildung 4-1). Fünf Hauptkategorien (vergleiche Tabelle 4-1) existieren bereits, die im zweiten Schritt nun erweitert und mit Subkategorien gefüllt werden. In der dritten Phase beginnt der Codierprozess. Eine Kategorie kann auch als Code bezeichnet werden und repräsentiert ein Themengebiet. Das Material wird nacheinander von oben nach unten durchgearbeitet und abschnittsweise in die Kategorien einsortiert. Da ein Abschnitt mehrere Themen enthalten kann, ist auch eine mehrfache Codierung möglich. Ist ein Satz für das Forschungsthema nicht relevant, bleibt er uncodiert. Nach dem ersten Durchlauf werden die mit der gleichen Kategorie codierten Textstellen zusammengefasst. Der sechste Schritt geht mit dem fünften einher: Anhand des vorgefundenen Materials werden die Subkategorien induktiv gebildet. Die vorher sehr allgemein gehaltenen Hauptkategorien werden nun ausdifferenziert und mit den (neuen) Subkategorien strukturiert. Daraufhin beginnt ein erneuter Durchlauf durch das gesamte Material. Im zweiten Codierprozess werden die bereits codierten Textstellen den ausdifferenzierten Subkategorien zugeordnet. Durch das neue Gedankengut, das sich mit der induktiven Kategorienbildung herauskristallisiert, entsteht ein Wechselspiel mit der

Forschungsfrage. Diese kann ständig um die zusätzlich erhaltenen Ideen erweitert werden. Die Pfeile von Schritt 5 und 6 zur zentralen Forschungsfrage unterstreichen dies. Die Schritte 4-7 werden so lange in einer Rückkopplungsschleife durchgeführt, bis die Subkategorien ausreichend differenziert sind. Abschließend erfolgen im letzten und aufwendigsten Schritt die Evaluierung sowie die quantitative Auswertung, die durch Visualisierungen für den Leser veranschaulicht werden kann. [45, S. 100]

4.4 Gütekriterien

Am Ende einer jeden qualitativen Inhaltsanalyse muss nach Mayring sichergestellt werden, dass die Gütekriterien eingehalten werden. Um den Status einer wissenschaftlichen Forschungsmethode für sich beanspruchen zu können, sind sowohl die klassischen als auch die spezifisch inhaltsanalytischen Gütekriterien zu beachten. Zu den klassischen Gütekriterien zählen zum einen die Reliabilität und zum anderen die Validität.

- **Reliabilität:** Die Forschungsoperation muss unter gleichen Bedingungen auch durch andere Forschende zu ähnlichen Ergebnissen führen und reproduzierbar sein. Sie kann auch über die Intersubjektivität, die die Subjektivität des Autors ausschließt, beschrieben werden. Dabei grenzt sich die Intersubjektivität insofern von der Objektivität ab, da die Daten zwar für mehrere Betrachter gleichermaßen nachvollziehbar, aber dennoch nicht objektiv messbar sind.
- **Validität:** Es muss das erforscht werden, was erforscht werden soll. Die Ergebnisse müssen plausibel dargestellt werden und der Prozess nachvollziehbar dokumentiert sein. Der Autor legt transparent alle zur Verfügung stehenden Daten von der Erhebung (Originalaudio auf Anfrage) bis zur Auswertung vor.

Zu den spezifisch inhaltsanalytischen Gütekriterien zählt die Intercoderreliabilität. Es wird überprüft, wie ähnlich die Ergebnisse sind, wenn verschiedene Forschende die Kategorien auf das Material anwendet. Die Ergebnisse können über Koeffizienten, wie zum Beispiel das Reliabilitätsmaß nach Krippendorff, verglichen werden. [44, S. 123-129]

Kuckartz nennt als weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Intercoderreliabilität das einfache Maß der Übereinstimmung oder den Reliabilitäts-Koeffizienten Cohens Kappa. Er ergänzt die spezifisch inhaltsanalytischen Gütekriterien um die Intracoderreliabilität, mit der die Stabilität des eigenen Codierverhaltens nachgewiesen werden kann. Dabei wird untersucht, wie nah eine erneute Codierung durch ein und dieselbe Person an die Ergebnisse aus der ersten Codierung herankommen. [46, S. 71]

Da die erhobenen Daten nur durch den Autor und nicht von einer Gruppe ausgewertet wurden, wird auf die Reliabilitätsprüfung verzichtet. Angesichts der begrenzten Anzahl an Interviews und dem erheblichen zeitlichen Aufwand, der über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen würde, wird eine transparente Dokumentation und eine plausible Darstellung der Ergebnisse als angemessen erachtet. Die Einhaltung der klassischen Gütekriterien ist damit sichergestellt.

4.5 Auswahl der Interviewpartner

Zunächst wird festgelegt, wer interviewt werden soll. Die Befragten sollen über einen längeren Zeitraum mit dem Dokumentationssystem vertraut sein und über die dementsprechende Ausbildung und das Wissen in dem Fachgebiet verfügen. Die Erfahrung, das Alter, das Geschlecht und die Herkunft spielen bei der Auswahl keine Rolle. Entscheidend ist die derzeitige Position im Unternehmen. Ausgewählt wurden zwei verantwortliche Führungskräfte: Bauleiter und Polier. Beide Positionen decken unterschiedliche Anforderungen an die Dokumentation ab. Der Polier ist während des Vortriebs immer im Tunnel und damit direkt in den Arbeitsprozess involviert. Der Bauleiter überprüft die Dokumentation und pflegt den Kontakt zum Bauherrn, ist also genauso aktiv daran beteiligt.

4.6 Vorbereitung der Interviews

Analog zum Bewertungsbogen wird ein standardisierter Interviewleitfaden erstellt, um einheitliche Ergebnisse zu erhalten und die unterschiedlichen Interviews der drei Baustellen vergleichbar zu machen. Die Interviews mit den Bauleitern sind in fünf Blöcke unterteilt und orientieren sich an den Inhalten der Arbeit wie in Kapitel 4.1 beschrieben, siehe Tabelle 4-1.

Block	Inhalt
I	Angaben zur Person
II	Digitalisierung im Tunnelbau
III	Digitalisierung im eigenen Unternehmen
IV	Partnerschaft (mit dem Auftraggeber)
V	Zukunftsausblick

Tabelle 4-1: Aufteilung des Interviews

Bei den Polieren entfällt der vierte Block, da sie in der Regel keinen direkten Kontakt zum Bauherrn haben. Block I-III und V sind identisch zum Leitfaden der Bauleiter. Die in den Leitfäden enthaltenen Fragen sind den Anhängen 7.2 und 7.3 zu entnehmen.

4.7 Durchführung der Interviews

Um im Nachgang eine detaillierte Analyse zu ermöglichen, wurden die Interviews mit einem Audiorekorder aufgezeichnet. Alle Interviewpartner haben sich damit einverstanden gezeigt und die in Anhang 7.4 abgebildete Einverständniserklärung unterzeichnet. Die Interviews haben im Schnitt ca. 20 Minuten gedauert. Der Tabelle 4-2 können die Baustelle, die Position, das Datum, die Dauer und die Erfahrung der befragten Person entnommen werden.

Baustelle	Position	Datum	Dauer des Interviews	In der Tunnelbaubranche tätig seit
A	Bauleiter	17.10.2023	17:43 min	12 Jahren
A	Polier	25.11.2023	18:22 min	20 Jahren
B	Tunnelingenieur („Bauleiter“)	11.12.2023	15:40 min	12 Jahren
B	Schichtingenieur („Polier“)	07.12.2023	20:16 min	3 Jahren
C	Bauleiter	26.01.2024	27:10 min	4 Jahren
C	Polier	26.01.2024	09:38 min	21 Jahren

Tabelle 4-2: Interview-Daten

4.8 Ergebnisse der Interviews

Die Auswertung der sechs Interviews dieser Masterarbeit erfolgt mit Unterstützung der Software MAXQDA. [47] Die Softwarefunktionen ‚visual tools‘ (visuelle Hilfsmittel) und ‚mixed methods‘ (Methoden zur Auswertung mit der Kombination aus qualitativen und quantitativen Daten) werden für die Ergebnisdarstellung angewendet.

4.8.1 Codewolke

In Abbildung 4-2 ist die Codewolke zu sehen, die die Kategorienhäufigkeit widerspiegelt. Je öfter Textstellen der sechs Interviews in die Kategorien einsortiert werden, desto größer ist die Schrift. Die jeweiligen Subkategorien, die der gleichen Kategorie untergeordnet sind, sind in der gleichen Farbe dargestellt – die Farbzweisung zu den Kategorien hat keine Bedeutung. Da den Interviewpartnern keine Multiple Choice, sondern offene Fragen gestellt wurden, haben sie von sich aus intuitiv geantwortet und ohne Beeinflussung das Material für die Kategorien erzeugt.



Abbildung 4-2: Codewolke (Kategorien nach Häufigkeit)

4.8.2 Beschreibung der Kategorien

Die entwickelten Codes mit den dazugehörigen Subkategorien sind in Tabelle 4-3 aufgelistet. Die Farben der Kategorien bleiben für eine bessere Übersicht für die gesamte Auswertung erhalten. Die Beschreibung, wie die Subkategorie entwickelt wurde, was sie bedeutet und die dazugehörige Anwendung für die Textstellen in den transkribierten Interviews, sind in der dritten Spalte zu finden. Zu jeder Subkategorie wird ein Beispiel mit genauer Verortung gezeigt.

Code	Subkategorie	Beschreibung & Anwendung	Beispiel		
			Person	Absatz	Antwort
Angaben zur Person	Werdegang vom Studenten zum Tunnelbauleiter	Die Person hat studiert und im Anschluss Erfahrung auf der Baustelle gesammelt, bevor sie die Position als Bauleiter eingenommen hat.	BL C	3	Nach 2,5 Jahren im Ingenieurbau bin ich zum Tunnelbau gewechselt und durfte in Berlin eine Baustelle für ein Hochspannungskabel leiten. Nun arbeite ich seit 1,5 Jahren in der Bauleitung beim aktuellen Tunnelprojekt.

	Werdegang vom Mineur zum Polier	Die Person ist nach der Lehre zum Mineur durch eine Ausbildung oder gute Leistungen zum Polier aufgestiegen bzw. ernannt worden.	P A	3	Ich habe klein angefangen als Mineur, mit der Zeit nachher als Maschinist, dann als Drittleführer gearbeitet, bevor ich die Ausbildung zum Polier gemacht habe.
	Polieraufgaben	Die Person sieht ihre täglichen Aufgaben primär aktiv draußen auf der Baustelle, die Dokumentation wird nicht direkt genannt.	P C	5	Ich bin als Polier verantwortlich für einen TBM-Vortrieb und kümmere mich zusätzlich um die Querschläge.
	Bauleitertaufgaben: Controlling / Datenmanagement	Die Person sieht ihre täglichen Aufgaben primär in der proaktiven Bauleitung, die Dokumentation wird nicht direkt genannt.	BL B	5	Ich bin der Tunneloberbauleiter für das aktuelle Projekt. Meine Verantwortung umfasst das Datenmanagement der Maschinen und der anderen technischen Komponenten. Ich bin auch der Manager der Schichtingenieure und zwei weiterer Ingenieure in meinem Team, sodass ich insgesamt für 10 Personen verantwortlich bin. Ein gewisser Teil des Vertragsmanagements gegenüber dem Auftraggeber gehört ebenfalls zu meinem Aufgabenbereich.
	Bauleitertaufgaben: Dokumentation digitalisieren	Die Digitalisierung der Dokumentation gehört zu den tagesfüllenden Aufgaben der Person. Die Dokumentation wird von der Person als erstes vor weiteren Bauleitungsaufgaben genannt.	P B	5	Derzeit bin ich als Schichtingenieur angestellt und somit jeden Tag mit meiner Schicht im Tunnel. Meine Aufgaben sind die Informationseinholung und Dokumentation, sowohl für den AG als auch für uns selbst, um daraus zu lernen.
Digitalisierung allgemein	Definition: Zukunft	In den Augen der Person wird die Digitalisierung als 'die Zukunft' definiert.	BL B	8	Die Zukunft.
	Definition: Laptop statt Stift & Papier	Die Person versteht unter der Digitalisierung, dass ein Laptop, ein Tablet oder ein Smartphone anstelle von Stift und Papier verwendet wird und die Dokumentation ohne Zwischenschritt digital erfolgt.	BL C	8	Ich verstehe die direkte Erfassung der Daten am PC unter Digitalisierung. Wenn die Zwischenschritte, die Daten mit Stift auf Papier aufzuschreiben und sie zu übertragen, wegfallen.
	Definition: Digitale Modellierung	Die Digitalisierung beginnt für die Person bereits bei der digitalen Planung / digitalen Modellierung.	P B	8	Gleichzeitig kann es auch für digitale Modellierung und die Verwendung von iPads anstelle von physischen Zeichnungen stehen, wie es auf einigen konventionellen Baustellen meiner Firma praktiziert wird.
	Persönliche Präferenz: digital	Die Person bevorzugt es digital zu arbeiten und dabei komplett auf Stift und Papier zu verzichten.	BL A	14	Wenn die Software gut funktioniert, gern lieber direkt digital. Ich brauche keine Ordner im Büro.
	Persönliche Präferenz: Beides	Die Person arbeitet gerne sowohl digital als auch mit Stift und Papier und positioniert sich nicht klar für eine Seite.	P A	14	Beides, weil beides für unterschiedliche Situationen eigene Vorteile mit sich bringt. Die Fotos draußen mache ich sofort mit dem Handy, das Zyklusdiagramm wird im Nachgang im Büro angefertigt. WLAN ist im Tunnel vorhanden, daher werden die Fotos sogar direkt hochgeladen.
	Positive Auswirkung der Digitalisierung	Die Person erwähnt Aspekte, die als positive Auswirkungen der Digitalisierung im Tunnelbau gewertet werden.	BL A	12	Die direkte digitale Eingabe des Poliers hilft extrem, weil sie der Bauleitung die Arbeit abnimmt und somit sehr viel Zeit und Ressourcen spart.
	Negative Auswirkung der Digitalisierung	Die Person erwähnt Aspekte, die als negative Auswirkungen der Digitalisierung im Tunnelbau gewertet werden.	P C	23	Das kann natürlich aber auch den Nachteil mit sich bringen, dass weniger kommuniziert wird. Da die Bauleiter nicht mehr so viel im Tunnel sind, fehlt natürlich der ganzheitliche Überblick. Manchmal ist es schon besser, sich direkt vor Ort zu besprechen.
	Besseres Verhältnis zu MitarbeiterInnen	Die Person ist der Meinung, dass durch die Digitalisierung die Kommunikation sowie die Transparenz und damit auch	P B	23	Besonders für mich und das Team auf der TBM ist es einfacher, sich verständlich auszudrücken.

		das Verhältnis zwischen den MitarbeiterInnen verbessert wird.			
Aktueller IST-Zustand Tunnelbau	Fortschrittliche Entwicklung	Die Person denkt, dass der Tunnelbau auf einem guten Weg in Richtung digitaler und damit wirtschaftlicher Zukunft ist.	P C	10	Es hat sich die letzten Jahre viel getan, mittlerweile finde ich den Tunnelbau sehr fortschrittlich.
	Entwicklung noch am Anfang	Die Person ist der Meinung, dass der Tunnelbau noch weit von einer digitalen und damit wirtschaftlichen Zukunft entfernt ist.	BL B	10	Der Tunnelbau ist eine der konservativsten Branchen. Wir bevorzugen es, das zu tun, was wir schon immer getan haben, daher ist es nicht einfach, Dinge voranzubringen.
	Konventioneller weiter als Maschineller Tunnelbau	Die Person sieht den konventionellen im direkten Vergleich zum maschinellen Tunnelbau hinsichtlich der digitalen Dokumentation weiter vorn.	P B	10	Aber ich sehe einige Unterschiede zwischen konventionellem und maschinellen Tunnelbau. Der Hauptgrund, warum wir beim konventionellen Tunnelbau weiter sind, liegt daran, dass wir in der Vergangenheit viele konventionelle Tunnelbaustellen hatten.
	Eigenes Unternehmen vorne im Vergleich	Die Person ist davon überzeugt, dass das eigene Unternehmen im Vergleich zu anderen in der Branche in Bezug auf die Digitalisierung sehr gut entwickelt ist.	BL A	12	Firma B ist hinsichtlich der Digitalisierung sehr weit entwickelt, vor allem durch die selber entwickelte Dokumentationssoftware.
	Tunnelbau im Vergleich zum Hochbau weiter vorn	Im direkten Digitalisierungsvergleich zum Hochbau sieht die Person den Tunnelbau vorne.	P C	10	In meinen Augen ist er definitiv digitaler als der Hochbau.
	Tunnelbau im Vergleich zum Hochbau hinterher	Im direkten Digitalisierungsvergleich zum Hochbau sieht die Person den Tunnelbau hinten.	BL A	10	Der Tunnelbau hinkt weit hinter dem Hochbau hinterher, vor allem beim Thema BIM.
Software	Externe Software aus wirtschaftlichen Gründen	Die Firma der befragten Person arbeitet aus wirtschaftlichen Gründen mit einer externen Dokumentationssoftware. Es existiert in dem Fall keine interne Lösung.	BL B	17	Wir arbeiten mit der Software des TBM-Herstellers. Da wir eine Software zur Speicherung aller Daten von der Maschine benötigen, ergibt es Sinn, mit dem Unternehmen zu arbeiten, das die Maschine stellt. In diesem Fall haben wir vor allem aus finanziellen Gründen entschieden. Zusätzlich nutzen wir vorrangig Excel und andere Microsoft-Produkte.
	Eigene Software für konventionellen Vortrieb	Die Firma der befragten Person hat eine eigene Dokumentationssoftware entwickelt und wendet diese an. Die befragte Person kann auch im TBM-Vortrieb arbeiten und über die KollegInnen oder von eigenen Erfahrungen aus dem konventionellen Tunnelbau berichten.	BL A	17	Wir arbeiten mit einem selbst entwickelten System. Für den Tunnelbau gab es vorher kein richtiges standardisiertes Tool wie zum Beispiel im Hochbau, besonders in Bezug auf das Schichtdiagramm zum Beispiel.
	Tunnel-Information-Modeling	Der Begriff 'TIM' kommt im Interview vor. Die Verwendung bzw. der Nutzen der Software für das Projekt spielt dabei keine Rolle, allein die Kenntnis bzw. die Nennung ist ausreichend.	BL A	10	Wobei derzeit bei unserem Projekt mit dem Allianz-Vertrag und BIM im Tunnelbau sehr viel Neues ausprobiert wird.
	Nachteile der genutzten Software	Die Person nennt einen Nachteil der verwendeten Software (betrifft bei Firma A die eigene und bei Firma B & C die externe Software)	P C	19	Der Nachteil ist derzeit noch, dass man die Programme nur am PC nutzen kann.

	Vorteile der genutzten Software	Die Person erwähnt einen Vorteil der verwendeten Software (betrifft bei Firma A die eigene und bei Firma B & C die externe Software).	BL C	19	Die Software konnten wir uns mit viel Arbeit aber gut an uns anpassen lassen. Man musste am Anfang noch immer jeden Kommentar zu einer Aktivität abtippen, auch wenn er identisch zum vorherigen war. Mittlerweile ist es endlich möglich aus allen bisher geschriebenen Kommentaren in einem Drop-down Menü auszuwählen. Mit ein wenig Einarbeitung funktioniert das Programm sehr gut.
	Verbesserungspotenzial	Unabhängig von der verwendeten Software werden Verbesserungsvorschläge im Hinblick auf die Software und die allgemeine Anwendung gemacht.	P A	19	Bei 2 oder 3 Vortrieben kann man nicht überall vor Ort sein. Es wäre sinnvoll, wenn auch die anderen Mitarbeiter dokumentieren könnten.
Entwicklung im Unternehmen	Eigene Digitalisierungsabteilung	Es existiert eine eigene Abteilung mit mehreren MitarbeiterInnen in der Firma des Befragten, die sich um die firmeninterne IT kümmert und an einer eigenen Software arbeitet.	BL C	21	Es gibt eine eigene IT-Abteilung in der Firma, die nur an der Digitalisierung arbeitet. Teilweise wird Programmierarbeit schon an Extern vergeben, aber wir definieren genau wie und was wir haben wollen.
	Einbeziehung der MitarbeiterInnen	Die Person wird zu den eigenen Wünschen und Ideen für eine bessere Software befragt und mit in die Entscheidungsfindung einbezogen.	P C	21	Wir Poliere werden gut mit in die Entscheidungsfindung einbezogen und dürfen Vorschläge machen.
	MitarbeiterInnen nicht mit einbezogen	Die Person wird nicht zu den eigenen Wünschen und Ideen für eine bessere Software befragt und nicht mit in die Entscheidungsfindung einbezogen.	P A	21	Ich bin persönlich noch nicht in den Entwicklungsprozess mit einbezogen worden.
	Vorhandene Bereitschaft der MitarbeiterInnen	Die Person denkt von den eigenen MitarbeiterInnen, unabhängig vom Geschlecht oder Alter, dass sie bereit dazu sind direkt digital zu dokumentieren.	P B	12	Bei der Einführung mögen die Mitarbeiter die neuen Strukturen oft nicht. Aber wenn die Anwendungen und Programme reibungslos laufen und intuitiv genug sind, haben die Leute nach ein bis zwei Wochen kaum Probleme mehr.
Verhältnis zum Auftraggeber	Gutes Verhältnis	Das Verhältnis zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber wird für gut empfunden.	BL C	24	Das Verhältnis zum Auftraggeber ist größtenteils sehr gut. Nur vereinzelt kommt es mit gewissen Personen zu Meinungsverschiedenheiten.
	Allianz-Vertrag	Das partnerschaftliche Vertragsmodell 'Allianz-Vertrag' - als Versuch, in Zukunft Projekte ohne Streitigkeiten der Vertragspartner abzuwickeln - wird erwähnt.	BL A	26	Durch den Allianz-Vertrag ergeben sich einige Besonderheiten, daher ist Learning by Doing angesagt. Es entstehen neue Herausforderungen mit denen nicht gerechnet wurde, sodass der Vertrag regelmäßig nochmal überdacht werden muss. Gewisse Punkte aus dem Vertrag können nicht so ausgeführt werden wie gedacht. Aber der Allianz-Vertrag bringt auch einige Freiheiten mit sich, das Klassendenken ist nicht mehr notwendig.
	Live-Tracking des AG	Der Auftraggeber hat einen vertraglich geregelten Zugang zum Live-Tracking unter Tage und kann damit aus dem Büro den Fortschritt über eine Software in Echtzeit mitverfolgen.	BL C	26	Durch die Möglichkeiten des Live-Tracking und der ungefilterten Einsicht des AG kann es auch negative Auswirkungen haben, da man sich deutlich angreifbarer macht.
Zukunftsvorstellung	Maschine ersetzt Menschen	Die Person kann sich vorstellen, dass die TBM in Zukunft automatisiert (ohne Maschinenfahrer) fahren kann oder dass zumindest Teile - wie der Ringbau - automatisch ablaufen.	BL C	29	Die Automatisierung der TBM kann ich mir gut vorstellen. In der weiten Zukunft könnte sie ohne die Steuerung durch einen Menschen fahren. Realistischer scheint mir der automatisierte Tübbingeinbau. Es ist nicht viel anders als beim Autobau: Der Abstand zum Schild, der Erektor und die Tübbinge bleiben immer gleich. Da kann definitiv in Zukunft viel passieren.

Dokumentation weiterhin nicht direkt digital	Die Person glaubt nicht an die Zukunft der digitalen Dokumentation, sondern geht davon aus, dass weiterhin Stift und Papier verwendet werden.	P A	28	Wir haben WLAN im Tunnel, theoretisch könnte ich sofort an der Ortsbrust alles mit einem Tablet / Laptop dokumentieren. Aber da wäre der Sinn verfehlt, es reicht, das im Nachgang im Büro zu erledigen.
Dokumentation direkt digital	Die Person ist davon überzeugt, dass die Dokumentation in Zukunft direkt digital abläuft und keine Zwischenschritte mehr nötig sind.	P B	30	Wenn wir es einfach und organisiert in nur einer Anwendung halten können, denke ich, dass alles direkt über ein Tablet oder ein Smartphone erledigt wird in Zukunft.

Tabelle 4-3: Beschreibung und Anwendung der Kategorien inklusive eines Beispiels

4.8.3 Häufigkeitstabelle

Tabelle 4-4 wertet die Subkategorien quantitativ nach der Häufigkeit der Codes in den Interviews aus. Insgesamt wurden 118 Textstellen kategorisiert. In der Tabelle können nicht nur die unterschiedlichen Positionen oder Baustellen verglichen werden, sondern ebenfalls die Gruppen untereinander. Die Häufigkeiten der Codes der Poliere (P) und der Bauleiter (BL) sind separat aufsummiert worden.

Häufigkeiten der Codes in den Interviews Baustelle	Poliere			Bauleiter			P	BL	Total
	A	B	C	A	B	C	A-C	A-C	
Angaben zur Person									
Werdegang vom Studenten zum Tunnelbauleiter		1		1	1	1	1	3	4
Werdegang vom Mineur zum Polier	1		1				2		2
Polieraufgaben	1		1				2		2
Bauleitertätigkeiten: Controlling/Datenmanagement				1	1			2	2
Bauleitertätigkeiten: Dokumentation digitalisieren		1				1	1	1	2
Digitalisierung allgemein									
Definition: Zukunft					1			1	1
Definition: Laptop statt Stift & Papier	1	1	1	1		1	3	2	5
Definition: Digitale Modellierung		1					1		1
Persönliche Präferenz: digital			1	1			1	1	2
Persönliche Präferenz: Beides	1	1			1	1	2	2	4
Positive Auswirkung der Digitalisierung	2	3	2	1	2	1	7	4	11
Negative Auswirkung der Digitalisierung			1			1	1	1	2
Besseres Verhältnis zu MitarbeiterInnen	1	1	1				3		3
Aktueller IST-Zustand Tunnelbau									
Fortschrittliche Entwicklung			1		1		1	1	2
Entwicklung noch am Anfang	1				1	1	1	2	3
Konventioneller weiter als Maschinellem Tunnelbau		1			1		1	1	2
Eigenes Unternehmen vorne im Vergleich		1		1	1		1	2	3
Tunnelbau im Vergleich zum Hochbau weiter vorn			1			1	1	1	2
Tunnelbau im Vergleich zum Hochbau hinterher		1		1	1		1	2	3
Software									
Externe Software aus wirtschaftlichen Gründen		1	1		1	1	2	2	4
Eigene Software für konventionellen Vortrieb	1			1	1		1	2	3
Tunnel-Information-Modeling				1				1	1
Nachteile der genutzten Software	2	1	1		1		4	1	5

Vorteile der genutzten Software	1	1				1	2	1	3
Verbesserungspotenzial	4	3	1	4		3	8	7	15
Entwicklung im Unternehmen									
Eigene Digitalisierungsabteilung		1	1	1	1	1	2	3	5
Einbeziehung der MitarbeiterInnen	1	1	1				3		3
MitarbeiterInnen nicht mit einbezogen	1						1		1
Vorhandene Bereitschaft der MitarbeiterInnen	1	1	1	1	1	1	3	3	6
Verhältnis zum Auftraggeber									
Gutes Verhältnis				1	1	1		3	3
Allianz-Vertrag				2				2	2
Live-Tracking des AG				1	1	1		3	3
Zukunftsvorstellung									
Maschine ersetzt Menschen			2		1	1	2	2	4
Dokumentation weiterhin nicht direkt digital	1					1	1	1	2
Dokumentation direkt digital		1		1			1	1	2
SUMME	20	22	18	20	19	19	60	58	118

Tabelle 4-4: Häufigkeiten der Codes in den Interviews

4.8.4 Ähnlichkeitsmatrix

Für den direkten Vergleich zweier Interviews kann unter anderem die Ähnlichkeitsmatrix herangezogen werden. Anhand des (Nicht-) Vorhandenseins der Codes in den Dokumenten wird untersucht, wie ähnlich sich zwei Interviews sind. Es existieren insgesamt vier gängige Berechnungsvarianten, mit denen eine Ähnlichkeitsmatrix erstellt werden kann. Die genaue Berechnung sowie die vier Varianten können Abbildung 4-3 entnommen werden. [46, S. 196]

		Dokument A	
		Code/Variablenwert kommt vor	Code/Variablenwert kommt nicht vor
Dokument B	Code/Variablenwert kommt vor	a	b
	Code/Variablenwert kommt nicht vor	c	d

a = Anzahl an Codes bzw. Variablenwerten, die in beiden Dokumenten identisch sind

d = Anzahl an Codes bzw. Variablenwerten, die in beiden Dokumenten *nicht* vorkommen

b und c = Anzahl an Codes bzw. Variablenwerten, die nur in einem Dokument vorkommen

Maß	Berechnung	Kommentar
Einfache Übereinstimmung	$(a + d) / (a + b + c + d)$	Das Vorhandensein und das Nicht-Vorhandensein werden als Übereinstimmung gewertet. Das Ergebnis entspricht der prozentualen Übereinstimmung.
Jaccard	$a / (a + b + c)$	Das Nicht-Vorhandensein wird vollständig ignoriert.
Kuckartz& Rädikers zeta	$(2a + d) / (2a + b + c + d)$	Das Vorhandensein wird doppelt gewertet, das Nicht-Vorhandensein einfach.
Russel und Rao	$a / (a + b + c + d)$	Nur das Vorhandensein wird als Übereinstimmung gewertet, das Nicht-Vorhandensein reduziert aber die Ähnlichkeit.

Abbildung 4-3: Ähnlichkeitskoeffizienten und ihre Berechnung [46, S. 198]

Für die durchgeführten Interviews und das entwickelte Kategoriensystem eignet sich die Berechnungsvariante nach ‚Kuckartz & Rädikers zeta‘. In den Augen des Autors trägt das übereinstimmende Nicht-Vorhandensein zur Ähnlichkeit bei, sollte jedoch weniger Gewicht haben als das Vorhandensein von Codes. Das Nicht-Vorhandensein von Codes wird somit einfach, das Vorhandensein zweifach gewertet. Die Dokumente sind sich nach dieser Definition ‚ähnlicher‘, wenn beide Dokumente die gleichen Codes enthalten.

Die Ähnlichkeitsmatrix der drei Poliere und der drei Bauleiter ist in Tabelle 4-5 dargestellt. Je ähnlicher sich zwei Interviews sind, desto näher ist der Wert bei 1,00 und desto dunkler ist das grün. Der erste Buchstabe steht für die Baustelle, der zweite für die Position des Befragten. Es muss jedoch dabei berücksichtigt werden, dass die Poliere zu Block IV (siehe 4.6) nicht befragt wurden und somit keine 100-prozentige Übereinstimmung mit den Bauleitern bekommen können.

	A : P	B : P	C : P	A : B	B : B	C : B
A : P	1,00	0,71	0,75	0,55	0,56	0,68
B : P	0,71	1,00	0,69	0,69	0,69	0,71
C : P	0,75	0,69	1,00	0,58	0,59	0,71
A : B	0,55	0,69	0,58	1,00	0,73	0,66
B : B	0,56	0,69	0,59	0,73	1,00	0,71
C : B	0,68	0,71	0,71	0,66	0,71	1,00

Tabelle 4-5: Ähnlichkeitsmatrix

Die Poliere untereinander und die Bauleiter untereinander ähneln sich am meisten. Die größte Übereinstimmung haben Polier B und Polier C, gefolgt von Bauleiter A und Bauleiter B.

4.8.5 Diagramme zu den Kategorien

Kreis- und Balkendiagramme visualisieren die Ergebnisse und werden zur Veranschaulichung angewendet. Die Subkategorien jeder Kategorie werden anhand ihrer Häufigkeiten separat ausgewertet. Je nachdem ob die Subkategorien in einem direkten Verhältnis zueinanderstehen oder nicht, sind sie als Kreis- oder Balkendiagramm dargestellt. Beispielhaft sind die Subkategorien ‚Persönliche Präferenz: digital‘ und ‚Persönliche Präferenz: beides‘ aus der Kategorie ‚Digitalisierung‘ in einem Kreisdiagramm visualisiert, weil ihre Summe 100 % ergibt (‚Persönliche Präferenz: analog‘ ist in keinem der Interviews vorgekommen). Die

Subkategorien der Kategorie ‘Entwicklung im eigenen Unternehmen‘ sind jedoch nicht direkt miteinander vergleichbar und werden daher in einem Balkendiagramm abgebildet. Die Auswertung erfolgt auf Basis der Ergebnisse aus Tabelle 4-4. Berücksichtigt werden muss, dass einzelne Interviewpartner gar nicht über gewisse Themengebiete gesprochen haben, während die Antworten anderer so ausführlich waren, dass zwei oder drei Textstellen in gewisse Kategorien einsortiert wurden. Sechs Einsortierungen einer Subkategorie bedeuten daher nicht automatisch, dass alle Interviewpartner eine Meinung zu der Subkategorie geäußert haben.

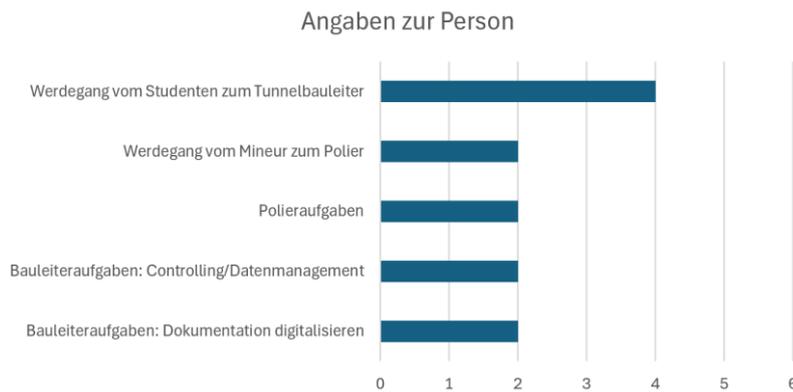


Abbildung 4-4: Codehäufigkeit zu ‚Angaben zur Person‘

Die Subkategorien der Kategorie ‚Angaben zur Person‘ in Abbildung 4-4 sind zur Einordnung des Interviewpartners dargestellt. Da auf Baustelle B ein Schichtingenieur in der Polierfunktion eingesetzt wird und dementsprechend kein offizieller Polier vor Ort tätig ist, haben vier der sechs Interviewpartner ausgesagt, dass sie den Werdegang vom Studenten zum Tunnelbauleiter absolviert haben. Beide Poliere haben den Werdegang vom Mineur zum Polier durchlebt und können sich trotz der Dokumentation vollumfänglich auf ihre Polieraufgaben konzentrieren. In der Bauleitung können sich nur die Hälfte der Befragten hauptsächlich um das Controlling bzw. ihre Bauleitertaufgaben kümmern. Die anderen zwei Bauleiter geben an, dass sie hauptsächlich mit der Digitalisierung der analogen Informationen in ihren täglichen Aufgaben konfrontiert sind.

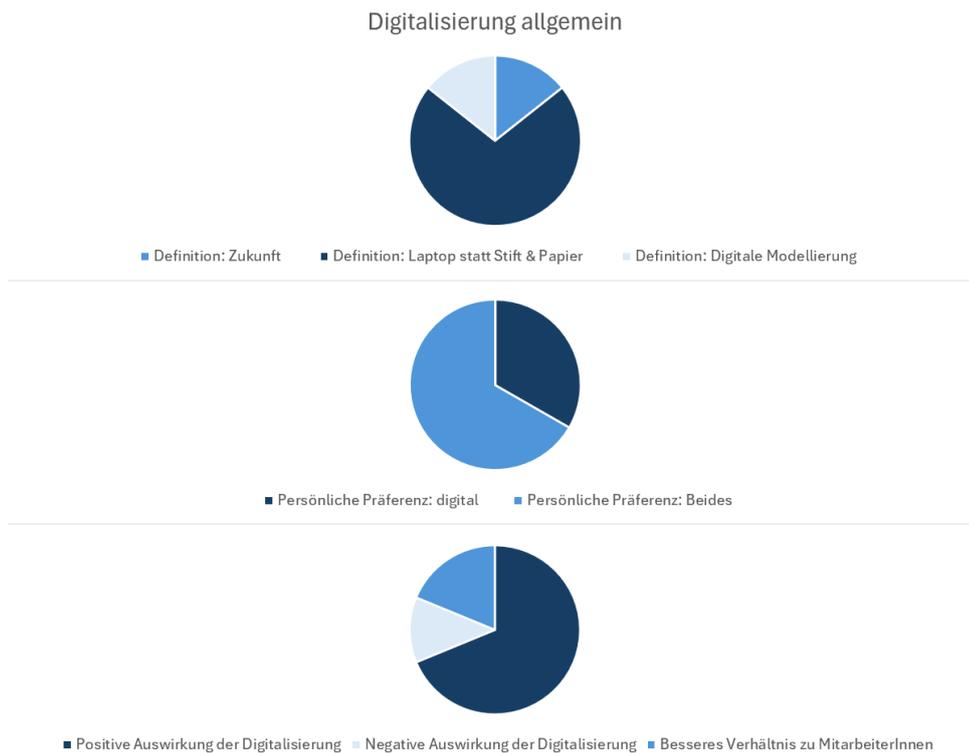


Abbildung 4-5: Codehäufigkeit zu ‚Digitalisierung allgemein‘

Die Digitalisierung steht, wie in Kapitel 2.1 erläutert, für verschiedene Dinge. So definieren auch die Befragten die Digitalisierung unterschiedlich. Wie in Abbildung 4-5 zu sehen ist, sind die meisten Interviewpartner der Meinung, Digitalisierung stehe für die Verwendung von digitalen Endgeräten anstelle von Stift und Papier. Die Mehrheit ist sich einig, dass die Digitalisierung deutlich mehr positive als negative Aspekte mit sich bringt. In der persönlichen Präferenz herrscht keine Übereinstimmung: 50% der Befragten arbeiten weiterhin auch gerne analog (in diesem Fall hat jeder Befragte genau eine Antwort gegeben).

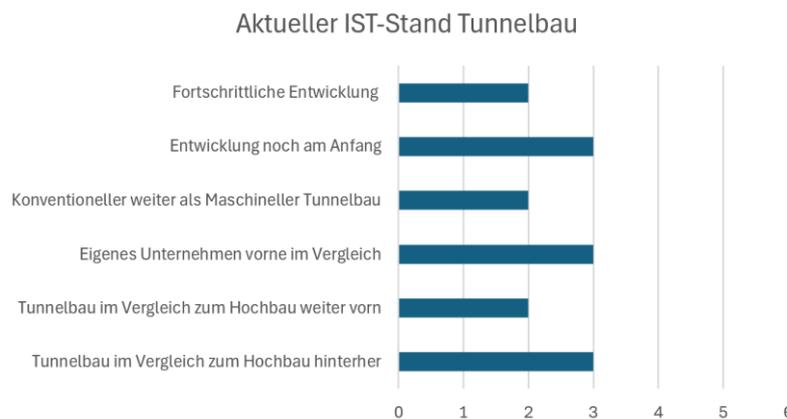


Abbildung 4-6: Codehäufigkeit zu ‚Aktueller IST-Zustand Tunnelbau‘

Der aktuelle Stand der Digitalisierung im Tunnelbau wird subjektiv sehr unterschiedlich bewertet. In Abbildung 4-6 sind die allgemeine Entwicklung, der Vergleich zum Hochbau, der Vergleich zwischen konventionellem und maschinellem Tunnelbau und das eigene Unternehmen im Vergleich quantitativ dargestellt. Einigkeit herrscht beim Vergleich zwischen konventionellem und maschinellem Tunnelbau sowie beim Blick auf das eigene Unternehmen: Alle sehen den konventionellen Vortrieb fortschrittlicher in der digitalen Entwicklung und denken sehr innovativ über sich selbst. Das persönliche Empfinden in Bezug auf die Entwicklung im Tunnelbau allgemein und im Vergleich zum Hochbau ist sehr unterschiedlich, wobei das Gefühl, der Tunnelbau würde zurück liegen, überwiegt.

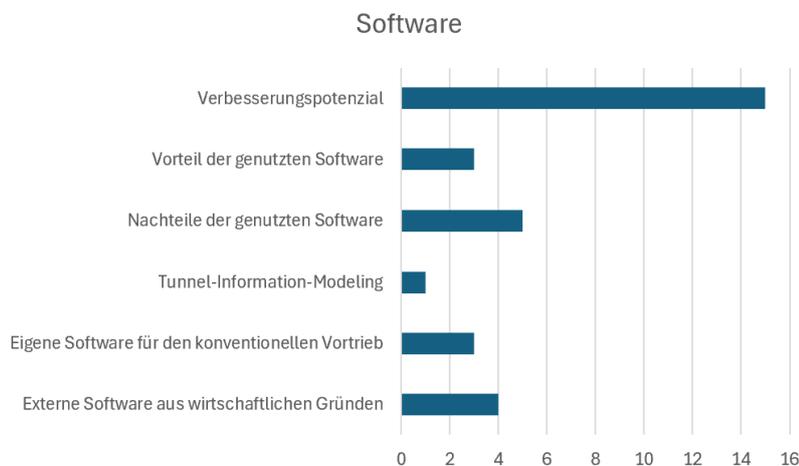


Abbildung 4-7: Codehäufigkeit zu ‚Software‘

Während der Vorstellung der Baustellen in den Kapiteln 3.1 bis 3.3 hat sich bereits herauskristallisiert, dass Tunnel, die maschinell vorgetrieben werden, mit einer externen Software arbeiten. Wie Abbildung 4-7 offenlegt, geben alle Interviewpartner an, dass die Wirtschaftlichkeit der entscheidende Faktor für diese Entscheidung war. Firma A mit der konventionell betriebenen Tunnelbaustelle hat eine eigene Software entwickelt. Firma B kann ebenfalls eine Software für den konventionellen Vortrieb vorweisen, was die Vermutung aus dem vorherigen Abschnitt, der konventionelle Tunnelbau sei im Hinblick auf die Digitalisierung weiter als der maschinelle, bestätigt. Die größere Anzahl an konventionell betriebenen Tunnelbaustellen sowie die längere Erfahrung mit dieser Art von Projekten sind die genannten Gründe für die fortschrittliche Entwicklung. Die Verteilung der Vor- und Nachteile sowie die enorme Häufigkeit der Subkategorie ‚Verbesserungspotenzial‘ zeigt, dass die Softwareprodukte noch erheblich optimiert werden müssen. Dies betrifft jegliche Art von Software, unabhängig von der eigenen Entwicklung.

Auffallend ist, dass der Begriff ‚Tunnel Information Modeling‘ nur ein einziges Mal bei Bauleiter A kurz erwähnt wird. Insgesamt werden die Möglichkeiten einer digitalen Modellierung auf den besuchten Baustellen noch nicht genutzt.

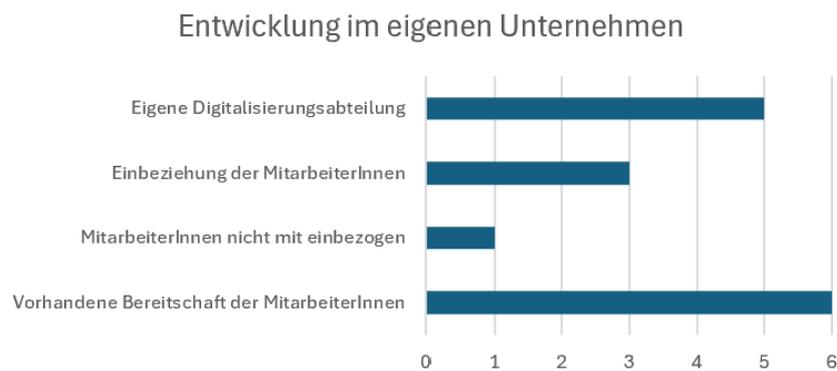


Abbildung 4-8: Codehäufigkeit zu ‚Entwicklung im eigenen Unternehmen‘

Die in der Einleitung beschriebene Tendenz, Unternehmen möchten mehr in die Digitalisierung investieren, wird auch durch die Interviewpartner bestätigt, wie in Abbildung 4-8 gezeigt. Alle Unternehmen der Befragten haben eine eigene Digitalisierungsabteilung und investieren in die digitale Zukunft. Drei von sechs Befragten geben an, sie seien sogar selbst in den Prozess der Weiterentwicklung von eigenen Softwareprogrammen involviert. Alle sind davon überzeugt, dass die Bereitschaft der MitarbeiterInnen da sei, digital zu arbeiten. Laut Aussagen der Interviewpartner müsse die Software eine übersichtliche Benutzerfläche haben und intuitiv zu bedienen sein. Zudem dürfe man sich nur auf das Wesentliche konzentrieren.

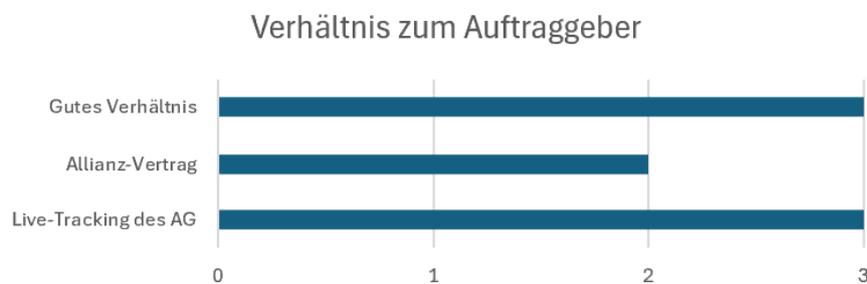


Abbildung 4-9: Codehäufigkeit zu ‚Verhältnis zum Auftraggeber‘

Die Abbildung 4-9 zeigt die Häufigkeiten der Kategorie ‚Verhältnis zum Auftraggeber‘. Die Interviewfragen wurden nur an die Bauleiter gerichtet, dementsprechend sind die Häufigkeiten geringer ausgefallen. Alle drei Bauleiter geben an, dass das Verhältnis zum AG gut ist. Die Gründe dafür liegen auf der Hand: die Digitalisierung fördert die Transparenz und eine engere Zusammenarbeit. Zudem werden mit dem Allianz-Vertrag Vertragsmodelle ausprobiert, die die Partnerschaft stärken soll. Das Live-Tracking des Auftraggebers ist auf allen drei Baustellen möglich.

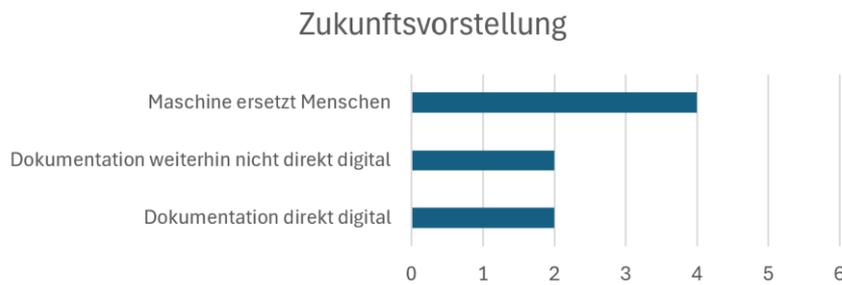
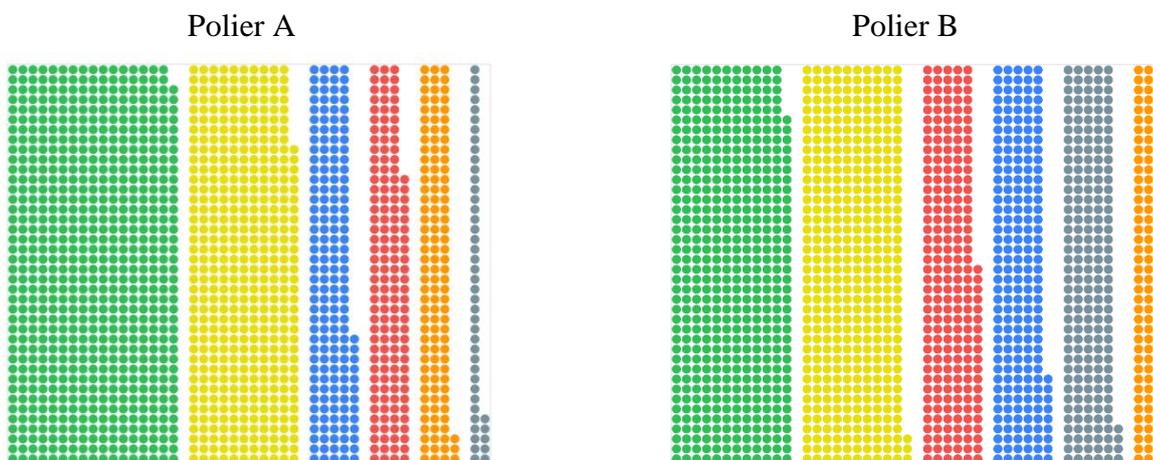


Abbildung 4-10: Codehäufigkeit zu ‚Zukunftsvorstellung‘

Die Zukunftsvorstellungen sind erneut sehr unterschiedlich, wie in Abbildung 4-10 zu erkennen ist. Dass die Tunnelbohrmaschine den Menschen in Zukunft ersetzt, können sich vier der Befragten vorstellen. Größtenteils geht es hierbei weniger darum, dass sich keine Tunnelbauer mehr im Tunnel befinden, sondern dass einzelne Aufgaben von der Maschine übernommen werden. Die Meinungen zu einer digitalen Dokumentation gehen deutlich auseinander: Die Hälfte befürwortet eine digitale Dokumentation, die andere Hälfte sieht keine wirklichen Veränderungspotenziale unter Tage.

4.8.6 Dokument-Portraits

Die Codierung kann für jedes Dokument einzeln grafisch über das Visualisierungstool ‚Dokument-Portrait‘ mit kleinen Kreisen verbildlicht werden. Die Subkategorien jeder Hauptkategorie erscheinen weiterhin in den oben zugeordneten Farben. Die Sortierung erfolgt nach der Häufigkeit der Codierung, wobei die Länge der codierten Textstelle mit einem Gewichtungsfaktor mit eingeht. Die Subkategorien einer Kategorie werden aufaddiert und als Säule zusammengefügt. Die Säulen werden nach Anteilen sortiert und absteigend von links nach rechts dargestellt. [46, S. 176]



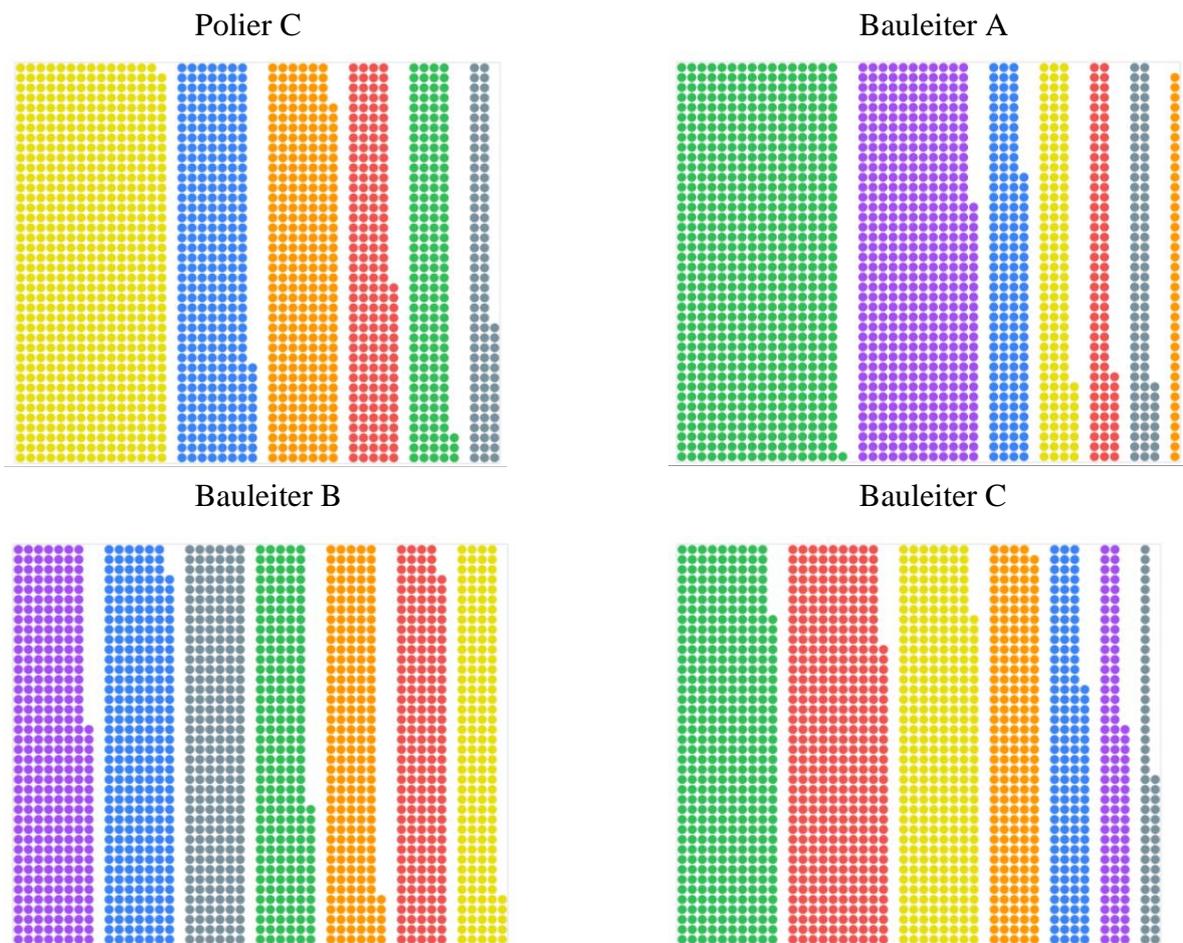


Abbildung 4-11: Dokumentenportraits

Die Dokument-Portraits der Interviewpartner sind in Abbildung 4-11 präsentiert. Auffällig ist, dass mit Polier A, Polier B, Bauleiter A und Bauleiter C vier der sechs Befragten primär über die ‚Software‘ sprechen. Da nicht mehr in Subkategorien unterteilt wird, lässt sich nicht weiter konkretisieren, inwiefern über zum Beispiel die Vor- oder Nachteile gesprochen wird. Bauleiter B ist sehr ausgeglichen angesichts der Häufigkeiten sowie der Länge der codierten Textstellen und schneidet somit jedes Themengebiet in etwa gleich oft bzw. lang an. Polier C hat große Anteile seines Interviews der ‚Digitalisierung allgemein‘ gewidmet und damit viel über die Definition, die Auswirkung, die persönliche Präferenz und das bessere Verhältnis zu den MitarbeiterInnen berichtet. Die Farbe Lila, die das ‚Verhältnis zum Auftraggeber‘ repräsentiert, ist erneut nur bei den Bauleitern zu finden. Bauleiter A und B haben sehr viel Kontakt zum Auftraggeber, zumindest sind die Anteile der Hauptkategorie ‚Verhältnis zum Auftraggeber‘ sehr groß.

4.9 Interpretation

Die Interviews bestätigen den Eindruck der Baustellenanalyse: Die Ansätze im konventionellen Tunnelbau sind sehr gut, dennoch ist reichlich Potenzial vorhanden. Im maschinellen

Tunnelbau besteht großer Aufholbedarf. Es herrscht Einigkeit darüber, dass die Auswirkungen der Digitalisierung größtenteils sehr positiv sind und die MitarbeiterInnen die digitalen Dokumentationsmöglichkeiten nutzen, wenn sie angeboten werden. Es ist für alle von größter Bedeutung, dass die Programme über eine übersichtliche Benutzeroberfläche intuitiv zu bedienen sind. Die Verschwendung von Zeit und Geld durch die mehrfache Führung von Dokumenten sowie das nachträgliche Übertragen in die EDV könnte laut Prognose der Befragten in der Zukunft minimiert werden.

Die Vorteile einer Dokumentationssoftware, die sämtliche Baustellenprozesse digital abbilden kann, kristallisieren sich heraus. Bauleiter A und Polier A berichten sehr zufrieden von der eigenen Dokumentationssoftware. Dennoch sollte die Nutzung einer externen Software abgewogen werden. Zum Beispiel bei Baustelle B, wo das Bauunternehmen noch nicht viel eigene Erfahrung mitbringt, kann dies sinnvoll sein.

Obwohl sich nach wie vor einige am Tunnelbau Beteiligte nicht vorstellen können, dass die Dokumentation direkt vor Ort digital erfolgt, ist zu erwarten, dass auf der Baustelle zukünftig moderne Softwareprogramme auf verschiedenen mobilen Endgeräten eingesetzt werden und zu einer optimierten, fehlerfreien Dokumentation beitragen. Es ist für die Interviewpartner zwar vorstellbar, dass die Tunnelbohrmaschine der Zukunft dem Menschen weitere Aufgaben abnimmt, dennoch sind sich alle sicher, dass die Entwicklung noch sehr viel Zeit und Forschung in Anspruch nehmen wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im letzten Kapitel dieser Arbeit werden die Erkenntnisse zusammengefasst und die Forschungsfragen beantwortet. Abschließend wird ein Ausblick gegeben und der weitere Forschungsbedarf dargestellt.

5.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Forschungsfrage 1: *Wie sieht der IST-Zustand der Baustellendokumentation bei den ausgewählten Tunnelbauprojekten aus? Was wird dokumentiert? Wie viele Dokumente werden ‚mehrfach‘ geführt, wie viel wird noch auf Papier geschrieben?*

Alle Projekte sind weit entfernt von der papierlosen Baustelle. Die Analysen der drei Tunnelbaustellen belegen die in der Einleitung vorgestellte Studie zum Digitalisierungsindex in Deutschland. Es sind bereits sehr gute Ansätze wie auf Baustelle A zu erkennen. Die digitalen Möglichkeiten, die theoretisch bereits zur Verfügung stünden, werden größtenteils aber noch nicht ausgeschöpft, wie Baustelle B und C gezeigt haben.

Des Weiteren kann zusammenfassend festgestellt werden, dass der Bürokratieaufwand sehr hoch ist. Die Notwendigkeit der Dokumentation muss bei einigen Protokollen in Frage gestellt werden. Wird nach dem Motto ‚So viel wie nötig, so wenig wie möglich‘ gehandelt, kann Zeit und Geld gespart werden. Die Tabelle 5-1 stellt alle geführten Dokumente der drei Baustellen dar. Auch wenn zwei der drei besuchten Tunnel im TBM-Vortrieb aufgefahren wurden und mit den besonderen Gegebenheiten spezielle Dokumentationsanforderungen einhergehen, ist die große Menge an Dokumenten im Vergleich zum konventionellen Vortrieb ersichtlich. Bei den Baustellen ohne digitale Dokumentationssoftware ist eine Mehrfach-Führung von Dokumenten üblich. Beispielsweise wird der Bautagesbericht in vier unterschiedlichen Zwischenständen abgelegt, zwei Mal analog und zwei Mal digital. Da Unternehmen B und C den digitalen Methoden nicht vertrauen, werden bereits direkt digital erfasste Dokumente parallel handschriftlich auf Papier geführt.

Art	Was?	Wer?	Wie/Wo?	Form?	Weiterverarbeitung?	Unterschrift?
konventionell	Abschlagsprotokoll	Polier	PC im Büro	digital	Ablage	Ja
	Zyklusdiagramm	Polier	PC im Büro	digital	Bautagesbericht	Ja
	Stützmittelprotokoll	Polier	PC im Büro	digital	Bautagesbericht	Ja
	Bautagesbericht	Polier	PC im Büro	digital	Bauleitung	Ja
	Fotodokumentation	Polier	Smartphone Tunnel	digital	Ablage	Nein
	Zeiterfassung Personal	Polier	PC im Büro	digital	Digitalisierung Bauleitung	Nein
	Geräteausfallbericht	Polier	PC im Büro	digital	Digitalisierung Bauleitung	Ja
Verschiebungskomponenten	GeologIn	Messung im Tunnel	digital	Ablage	Ja	
maschinell	Zyklusdiagramm	Maschinenfahrer	Fahrerkabine (TBM)	analog	Digitalisierung Bauleitung	Nein
	Maschinendaten	Maschinenfahrer	Fahrerkabine (TBM)	analog	Digitalisierung Bauleitung	Nein
	Meißelwartung	Maschinenfahrer	Vor Ort (TBM)	analog	Digitalisierung Bauleitung	Nein
	Probebohrung	Ringbauer	Vor Ort (TBM)	analog	Digitalisierung Bauleitung	Nein
	Schildschwanzluft	Ringbauer	Vor Ort (TBM)	analog	-	Nein
	Abstichmaß	Ringbauer	Vor Ort (TBM)	analog	Ablage	Ja
	Sehnenlängenmessung	Ringbauer	Vor Ort (TBM)	analog	Digitalisierung Polier	Nein
	Ringbauprotokoll	Ringbauer & Logistiker	Vor Ort (TBM)	Scan & analog	Digitalisierung Bauleitung	Ja
	Hinterfüllung	Hinterfüller	Vor Ort (TBM)	analog	Digitalisierung Bauleitung	Nein
	Mörtelprüfung	Hinterfüller	Vor Ort (TBM)	analog	Digitalisierung Polier	Nein
	Fettverbrauch	Schlosser	Vor Ort (TBM)	analog	Abrechnung	Nein
	Wartungsprotokoll	Mechaniker / Elektriker	Vor Ort (TBM)	analog	Digitalisierung Bauleitung	Nein
	Feldaufmaßblatt	Polier	Vor Ort (TBM)	analog	Digitalisierung Polier	Ja
	Fotodokumentation	GeologIn	Ortsbrust	digital	Geologischer Bericht	Nein
	Zeiterfassung Personal	Bauleitung	Bauleitungsbüro	digital	Abrechnung	Nein
	Bautagesbericht	Bauleitung	Bauleitungsbüro	digital	Bestätigung AG	Ja
Schadstellenprotokoll	ÖBA	Smartphone Tunnel	digital	Übergabe an AN	Ja	
Spalt- und Versatzmaß	ÖBA	Vor Ort (TBM)	analog	Übergabe an AN	Ja	

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der geführten Dokumente

Forschungsfrage 2: *Kann eine selbst entwickelte Software mit der Standardsoftware mithalten? Welche Vor- und Nachteile ergeben sich durch die Anwendung einer Standardsoftware?*

Die zur Verfügung stehenden Baustellendokumentationssoftwares haben einen hohen Standard erreicht. Der Vorteil der Anwendung einer Standardsoftware ist, dass diese ohne eigenen

Einsatz sofort zur Verfügung steht und laufend aktualisiert wird. Unmittelbar nach der Einarbeitung des Personals kann mit der Dokumentation begonnen werden. Da jede Baustelle individuelle Anforderungen an die Dokumentation mit sich bringt, ist es für Softwareanbieter schwierig, sämtliche Dokumente für alle Projekte abzudecken. Daher ist es erforderlich, dass die Vertragspartner vor Projektbeginn individuelle Anforderungen und Wünsche abstimmen. Die mit einer Standardsoftware einhergehenden Nachteile sind die große Startinvestition und die laufenden Kosten.

Mit einer eigenen Software bleibt das Unternehmen, das seine eigenen Wünsche und Ideen umsetzt, unabhängig von Softwareanbietern und kann selbst entscheiden, in welcher Form welche Daten aufgenommen und weiterverarbeitet werden.

Am Ende muss die Unternehmensleitung - abhängig unter anderem von der Größe des Unternehmens, der Anzahl der Tunnelbaustellen, dem Wunsch nach Unabhängigkeit und Selbstbestimmung sowie den technischen Möglichkeiten - abwägen und entscheiden, was die beste Lösung ist. Auch wenn Unternehmen eine eigene IT-Abteilung besitzen, ist eine Investition in eine eigene Softwareentwicklung erst sinnvoll, wenn der TBM-Vortrieb langfristig geplant ist und Informatiker mit dem nötigen Fachwissen für die Programmierung zur Verfügung stehen. In solchen Fällen kann eine Zusammenarbeit mit einem Softwareanbieter, der flexibel ist und die Anforderungen der Tunnelbaustellen kennt, sinnvoll sein.

Forschungsfrage 3: *Wie wirkt sich die Digitalisierung auf die Baustellenprozesse aus? Kann die Digitalisierung der Tunnelbaustelle zu einem partnerschaftlichen Verhältnis zum Auftraggeber und zu den MitarbeiterInnen beitragen?*

Die Ergebnisse der Interviews und die Erfahrungen auf der Baustelle verdeutlichen die positiven Aspekte der Digitalisierung. Die zu Beginn erwähnten Vorteile der Anwendung von digitalen Methoden, die vor allem eine Verbesserung der Dokumentationsgenauigkeit, der Produktivität und der Qualität betreffen, überwiegen. Wenn die MitarbeiterInnen eine vernünftige Einführung erhalten und mit einer einfachen Benutzeroberfläche von der Nutzung überzeugt werden, können auch die letzten negativen Einstellungen beseitigt werden.

Es ist sinnvoll, den Dokumentierenden Fristen für die Fertigstellung der Protokolle zu setzen. So ist eine direkte Verschriftlichung der Ereignisse nach der Tätigkeit garantiert und die Wahrscheinlichkeit korrekter Angaben höher. Im besten Fall werden Softwarelösungen angewendet, die über eine Cross Browser Kompatibilität verfügen und auch auf digitalen Endgeräten funktionieren.

Von großer Bedeutung ist die Botschaft der mit der Digitalisierung einhergehenden positiven Aspekte der Vernetzung und der Zeitersparnis. Die Bauleitung sollte trotz Live-Tracking im Büro und größerer zeitlicher Kapazitäten die Bauarbeiten vor Ort im Tunnel leiten und mit den

Verantwortlichen dort Entscheidungen treffen. Eine persönliche Kommunikation auf der Baustelle ist unabdingbar.

Die – durch die Digitalisierung gegebene – Transparenz hat positive Auswirkungen auf die Verhältnisse der Beteiligten zueinander. Alle Interviewpartner haben von einem partnerschaftlichen Umgang mit dem Auftraggeber und den KollegInnen berichtet. Zum Beispiel können mit einer digitalen Unterschrift Arbeitsgänge gespart werden, sodass alle Beteiligten profitieren. Auch die Kommunikation und Verständigung untereinander kann verbessert werden, wenn die Programme das Dokumentieren in verschiedenen Sprachen ermöglichen.

Forschungsfrage 4: *Ist eine digitale Transformation hin zu einem TIM-Modell möglich und umsetzbar?*

Trotz der vorhandenen Ansätze auf Baustelle A und C ist Tunnel Information Modeling auf der Baustelle in der Praxis noch kein Begriff. Der in Abbildung 2-2 gezeigte Kreislauf des im Zentrum stehenden Digitalen Zwillings endet nach der Planung bzw. spätestens nach der Vorbereitung der Ausführung. Nur einer der sechs Befragten hat von der Methode berichtet. Die Pilotprojekte sind der erste Schritt, das Potenzial wird aber noch nicht ausgeschöpft. Mit einem vollständig digitalen Datenfluss von der Ortsbrust bis zur Abrechnung können nicht nur Fehler vermieden, sondern Kosten und Risiken früher und mit weniger Aufwand ermittelt und gesteuert werden. Mit der verfügbaren Software können die Daten bereits heute theoretisch mit einem TIM-Modell rückgekoppelt werden. Die beste technische Innovation hat jedoch keinen langfristigen Nutzen, wenn die Anwender sie nicht verstehen und kein Interesse daran haben, sie zu implementieren. Im Mittelpunkt muss immer der Mensch stehen.

5.2 Ausblick und Forschungsbedarf

Obwohl die meisten Beteiligten bereit sind, digital zu dokumentieren, fehlen häufig die Voraussetzungen. Dies liegt weniger an den ausführenden Mineuren, Polieren oder der Bauleitung, sondern hauptsächlich an Geschäftsführungen und Projektleitungen, die bei der Einführung der Digitalisierung der Dokumentation noch zögern. Die Investitionen in digitale Endgeräte und Softwareprogramme sollten jedoch den eingesparten Personalstunden gegenübergestellt werden. Zudem muss die nicht quantitativ messbare Variable der Vermeidung von Übertragungsfehlern aufgrund der Schnittstellenreduzierung bewertet werden. Die Digitalisierung der Tunnelbaustellen kann nur dann erfolgreich sein, wenn alle Stakeholder – die Projektbeteiligten vom Auftraggeber über die PlanerInnen bis zum ausführenden Mineur – die gewinnbringenden Auswirkungen verinnerlichen.

Die Grundsätze für die partnerschaftliche Zusammenarbeit und die Vereinbarungen über standardmäßig zu führende Dokumente sollten überdacht werden, sodass der Bürokratieaufwand verringert wird und die Produktivität steigt. In diesem Zusammenhang sollten die Beteiligten auch überzeugt werden, digitale Unterschriften einzuführen.

Veraltete Methoden wie die Messung per Zollstock und die Eintragung der Daten von Hand können mithilfe von digitalen Werkzeugen, wie zum Beispiel einem 3D-Laserscan, ersetzt werden. Die geometrische Kontrolle der Maßhaltigkeit verläuft damit schneller, genauer und nachhaltiger. Es sollte erforscht werden, wie der Einsatz moderner Messinstrumente auf Tunnelbaustellen gefördert werden kann.

Oberstes Ziel muss die Entwicklung von Softwareprogrammen für die ausführenden Bauunternehmen und die Implementierung auf der Baustelle sein. Ganzheitlich betrachtet sollte der gesamte Prozess eines Tunnelprojekts von der Planung über den Bau bis zum Betrieb – vom ersten Entwurf bis zur Instandhaltung – abgebildet werden. Im Cloud-System eines solchen TIM-Modells sollten alle Dokumentationsdaten zur Verfügung stehen und die Weiternutzung ermöglichen.

Um konkurrenzfähig zu bleiben, muss die Tunnelbaubranche umdenken. Mit fortschreitender Digitalisierung werden Stift und Papier bald Geschichte sein. Der Tunnelbau kann mit der digitalen Transformation eine Revolution erleben.

6 Literatur

- [1] Deutsche Telekom AG, techconsult GmbH, "Der digitale Status quo im deutschen Baugewerbe: Digitalisierungsindex Mittelstand 2021/2022", 2022.
- [2] K. Mattiszik, R. Sitzberger, M. Schönwitz und J. Hartje, "Ein Bauplan für die Digitalisierung in der Bau- und Immobilienbranche: Eine Orientierungshilfe für die digitale Transformation" in *Agile Digitalisierung im Baubetrieb: Grundlagen, Innovationen, Disruptionen und Best Practices*, C. Hofstadler und C. Motzko, Hg., Wiesbaden, Heidelberg: SPRINGER VIEWEG, 2021, S. 47–78.
- [3] J. Müller-Brehm, P. Otto und M. Puntschuh, *Einführung und Überblick: Was bedeutet Digitalisierung?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/izpb/digitalisierung-344/digitalisierung-344/318096/einfuehrung-und-ueberblick-was-bedeutet-digitalisierung/> (Zugriff am: 23. Oktober 2023).
- [4] O. Bendel, *Digitalisierung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitalisierung-54195> (Zugriff am: 23. Oktober 2023).
- [5] C. Hofstadler, "Multisystemische Hybridpyramide für den agilen Baubetrieb: System- und Prozessinteraktionen mit der Digitalisierung" in *Agile Digitalisierung im Baubetrieb: Grundlagen, Innovationen, Disruptionen und Best Practices*, C. Hofstadler und C. Motzko, Hg., Wiesbaden, Heidelberg: SPRINGER VIEWEG, 2021, S. 3–46.
- [6] W. Günthner und A. Borrmann, *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [7] H. Exenberger, I. M. Massimo-Kaiser und M. Flora, "Current developments of digital ground modelling in tunnelling", *Geomechanics and Tunnelling* 15, Nr. 3, S. 284–289, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/geot.202100065>
- [8] abas Software GmbH, *Recht 4.0: Compliance Richtlinien im Zeitalter der Digitalisierung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://abas-erp.com/de/wissen/erp-blog/recht-40-compliance-richtlinien-im-zeitalter-der-digitalisierung> (Zugriff am: 19. Januar 2024).
- [9] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V., "BIM im Untertagebau: Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten", 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.daub-ita.de/publikationen/empfehlungen/>
- [10] A. Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, "Die BIM-Methode im Überblick" in *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, A.

- Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, Hg., 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 1–28.
- [11] G. Fröch und W. Gächter, *BIM - 5D-Planung und Gebäudemodellierung: Skriptum zum Vorlesungsteil WS 2019/20*. Innsbruck: Studia Universitätsverlag, 2019.
- [12] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, "Stufenplan Digitales Planen und Bauen: Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken", 2015.
- [13] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, "Masterplan BIM für Bundesbauten: Erläuterungsbericht", 2021.
- [14] Bundeskammer der Ziviltechniker:innen | Arch + Ing, *ÖBB führt BIM verpflichtend ab 2024 ein*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.arching.at/aktuelles/ztlegramm/oebb_bim_ausrollung.html.
- [15] M. Q. Huang, J. Ninic, Q.B. Zhang, "BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108S. 103677, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779820306313>
- [16] Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, "Stiftungsprofessuren: Ausschreibung 2019", 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ffg.at/ausschreibungen/stiftungsprofessur-2019>
- [17] M. Flora, G. Fröch und W. Gächter, "Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle", *Bautechnik* 97, H 11, S. 780–788, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/bate.201900095>
- [18] F. P. Rauth und M. König, "BIM im Tunnelbau" in *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, A. Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, Hg., 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [19] M. Türtscher, "Analyse und Prognose von Penetration und Vortriebsgeschwindigkeit bei maschinellen Vortrieben im Festgestein", Innsbruck: Innsbruck Univ. Press, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://bibsearch.uibk.ac.at/AC08926377>
- [20] W. Kalusche, *Projektmanagement für Bauherren und Planer*, 2. Aufl. R. Oldenbourg Verlag München Wien, 2005.
- [21] Austrian Standards international, "ÖNORM B 2110: Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen", 2023.
- [22] Austrian Standards international, "ÖNORM B2118: Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen unter Anwendung des Partnerschaftsmodells, insbesondere bei Großprojekten", 2023.
- [23] Deutscher Vergabe- und Vertragsausschuss für Bauleistungen, "VOB/B Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil B: Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen", 2016.

- [24] Deutscher Vergabe- und Vertragsausschuss für Bauleistungen, "VOB/A Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil A: Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen", 2019.
- [25] C. Hofstadler, Hg., *Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht: 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz*. Wiesbaden, Heidelberg: SPRINGER VIEWEG, 2019.
- [26] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Zurich, "SIA 118:2013: Allgemeine Bedingungen für Bauarbeiten", 2013.
- [27] B. Kochendörfer, J. H. Liebchen und M. G. Viering, *Bau-Projekt-Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [28] B. Kochendörfer und M. G. Viering, "Dokumentation und Kostenerfassung aufgrund gestörter Bauabläufe" in *Baubegleitende Rechtsberatung: Planung, Durchführung und Nutzung*, W. Heiermann, H. Franke und B. Knipp, Hg., München: C. H. Beck, 2002, S. 649–697.
- [29] K. Vygen, E. Jousen, D. Rasch und A. Lang, *Bauverzögerung und Leistungsänderung: rechtliche und baubetriebliche Probleme und ihre Lösungen*, 8. Aufl. Hürth: Werner Verlag, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://bibsearch.uibk.ac.at/AC16313835>
- [30] G. Girmscheid, *Angebots- und Ausführungsmanagement - Leitfaden für Bauunternehmen: Erfolgsorientierte Unternehmensführung vom Angebot bis zur Ausführung*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <https://bibsearch.uibk.ac.at/AC07998671>
- [31] Austrian Standards international, "ÖNORM B 2203-1: Untertagebauarbeiten: Teil 1: Zyklischer Vortrieb", 2023.
- [32] Austrian Standards international, "ÖNORM B 2203-2: Untertagebauarbeiten: Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb", 2023.
- [33] M. Flora und M. Türtscher, *Vorlesungsskript Angewandter Tunnelbau: VU SS 2023*. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2023.
- [34] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V., "Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen", 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.daub-ita.de/publikationen/empfehlungen/>
- [35] M. Flora und P. Teuscher, "Auswahl der Tunnelvortriebsmethode – Dynamisches Entscheidungsmodell" in *Beton-Kalender 2014*, 2013, S. 63–85, doi: 10.1002/9783433603352.ch4.
- [36] G. Kvasina, G. Goger und M. Huymajer, "Die Dokumentation bei zyklischem Tunnelvortrieb: Wesentliche Parameter als Grundlage für ein digitales Modell", *bauaktuell*, S. 155–161, Juli 2018.
- [37] K. C. Zach, *Ein Datenmodell zur digitalen Dokumentation des Bauprozesses im Tunnelbau*. Masterarbeit. Montanuniversität Leoben, 2021.

- [38] G. Kvasina, *Dokumentation bei zyklischem Tunnelvortrieb - Erhebung von wesentlichen Parametern von Bauzeit und Kosten als Grundlage für ein digitales Modell*. Diplomarbeit. TU Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, 2018.
- [39] C. Korath und M. Mann, *Webbasierte Schnittstellen für Daten Monitoring und Akquirierung im IoT Umfeld*. Bachelorarbeit. TU Wien, Fakultät für Informatik, 2017.
- [40] M. Huymajer, D. Operta, A. Mazak-Huemer und C. Huemer, "The Tunneling Information Management System – A tool for documenting the tunneling process in NATM projects", *Geomechanics and Tunneling*, Jg. 15, Nr. 3, S. 259–264, 2022, doi: 10.1002/geot.202100064.
- [41] M. Türtscher, "Betriebsdatenauswertung eines maschinellen Tunnelvortriebs am Beispiel des Versalstollens II beim Kraftwerk Kops II der Vorarlberger Illwerke AG" Diplomarbeit, Universität Innsbruck, 2006. [Online]. Verfügbar unter: <https://bibsearch.uibk.ac.at/AC05792905>
- [42] L. Staggel, *Die digitale Baustellendokumentation: Evaluation einer Software zur Digitalisierung des Baustellendokumentationsprozesses*. Masterarbeit. Innsbruck: Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2021.
- [43] T. Dresing und T. Pehl, Hg., *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende*, 8. Aufl. Marburg: Dr. Dresing und Pehl GmbH, 2018.
- [44] P. Mayring, *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*, 13. Aufl. Weinheim: Beltz, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://bibsearch.uibk.ac.at/AC16536326>
- [45] U. Kuckartz, *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. 69–469 Weinheim: Beltz Verlagsgruppe, 2018. [Online]. Verfügbar unter: http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783779946830
- [46] S. Rädiker und U. Kuckartz, *Analyse qualitativer Daten mit MAXQDA: Text, Audio und Video*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [47] VERBI – Software. Consult. Sozialforschung. GmbH, *MAXQDA 24*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.maxqda.com/de>.

7 Anhang

7.1 Standardisierter Bewertungsbogen für Baustellenbesuche

Es ist ein Aufenthalt auf der Tunnelbaustelle für 3-5 Werkzeuge geplant. Bei dem Besuch geht es um eine baubegleitende Beobachtung, bei der folgende stichpunktartig aufgeführte Fragestellungen betrachtet werden:

Allgemeiner Überblick über die Baustelle

- Wie ist der Eindruck der Baustellenstruktur?
- Gibt es klare Zuständigkeiten bzw. Aufgabenteilungen?

Digitalisierung

- Was wird dokumentiert?
- Datenerfassung: Welche Geräte werden verwendet? Tablets oder Stift und Papier?
- Sind Sensoren o. ä. für z.B. die Anzahl der Ein-/Ausfahrten oder Tonnage vorhanden? Wie wird der Fortschritt festgehalten?
- Wie schaut die Kommunikation aus?
- Kann über WLAN direkt eine Online-Lösung ermöglicht werden? Gibt es eine stabile Netzverbindung?
- Wie weit ist die Automatisierung bzw. Robotik? Gibt es Potenziale?

Softwarelösung

- Welche Software wird verwendet?
- Werden die Möglichkeiten angenommen? Wie ist die Bereitschaft der MitarbeiterInnen?
- Wie zufrieden sind die MitarbeiterInnen? Wie ist die Oberfläche – Auswahlmöglichkeiten oder eigenständiges Abtippen?
- Werden die Möglichkeiten ausgeschöpft? Welche Potenziale sind vorhanden?
- Wie sieht die Cybersicherheit aus?

Konventioneller vs. maschineller Vortrieb

- Was sind die Besonderheiten? Wo sind die Unterschiede?

7.2 Standardisierter Interview-Leitfaden des Bauleiters

- Einverständniserklärung über Tonbandaufnahme & Veröffentlichung
- Freigabebestätigung nach Transkription

Block I: Angaben zur Person

1. Werdegang
2. Angaben zu Position und Aufgaben im Unternehmen

Block II: Digitalisierung im Tunnelbau

1. Was verstehen Sie unter Digitalisierung?
2. Wie digital ist der Tunnelbau in Ihren Augen? Wie weit ist der Tunnelbau im Vergleich zu anderen Branchen, wie z.B. der Automobilindustrie oder dem Hochbau?
3. Hilft die Digitalisierung den Prozessen auf der Baustelle? Ist die Bereitschaft des Personals vorhanden?
4. Ganz ehrlich: Arbeiten Sie lieber mit Stift und Zettel oder digital?

Block III: Digitalisierung im eigenen Unternehmen

1. Mit welcher Softwarelösung wird bei Ihnen gearbeitet? Und warum?
2. Wie zufrieden sind Sie damit? Welche Vor- und Nachteile gibt es?
3. Wie wird die Entwicklung der Digitalisierung im Unternehmen vorangetrieben? Welche Mittel stehen zur Verfügung?

Block IV: Partnerschaft

1. Wie ist das Verhältnis zum Auftraggeber?
2. Kann die Digitalisierung auf dem Weg zu einer partnerschaftlichen Zusammenarbeit helfen bzw. das Verhältnis verbessern?

Block V: Zukunftsausblick

1. Was ist in einer vollständig digitalen Welt möglich?
2. Wie denken Sie, wird die Zukunft aussehen?

7.3 Standardisierter Interview-Leitfaden des Poliers

- Einverständniserklärung über Tonbandaufnahme & Veröffentlichung
- Freigabebestätigung nach Transkription

Block I: Angaben zur Person

1. Werdegang
2. Angaben zu Position und Aufgaben im Unternehmen

Block II: Digitalisierung im Tunnelbau

1. Was verstehen Sie unter Digitalisierung?
2. Wie digital ist der Tunnelbau in Ihren Augen? Wie weit ist der Tunnelbau im Vergleich zu anderen Branchen, wie z.B. der Automobilindustrie oder dem Hochbau?
3. Hilft die Digitalisierung den Prozessen auf der Baustelle? Ist die Bereitschaft des Personals vorhanden?
4. Ganz ehrlich: Arbeiten Sie lieber mit Stift und Zettel oder digital?

Block III: Digitalisierung im eigenen Unternehmen

1. Mit welcher Softwarelösung wird bei Ihnen gearbeitet? Und warum?
2. Wie zufrieden sind Sie damit? Welche Vor- und Nachteile gibt es?
3. Wie wird die Entwicklung der Digitalisierung im Unternehmen vorangetrieben? Werden Sie in die Entscheidungsfindung einbezogen?
4. Trägt die digitale Vernetzung zu einer besseren Zusammenarbeit mit den KollegInnen und Vorgesetzten bei?
5. Wie werden im Hinblick auf den ganzheitlichen Prozess im Verlaufe eines Tages die wiederkehrenden, wie die einmaligen Ereignisse abgebildet?

Block IV: Zukunftsausblick

1. Was ist in einer vollständig digitalen Welt möglich?
2. Wie denken Sie, wird die Zukunft aussehen?

7.4 Einverständniserklärung

Ich,, bin damit einverstanden, dass eine Tonbandaufnahme des Baustelleninterviews zur nachträglichen Bearbeitung gespeichert wird. Ich bestätige mit meiner nachstehenden Unterschrift, dass das Baustelleninterview mit Herrn Felix Ehmke im Zuge seiner Masterarbeit an der Universität Innsbruck gemeinsam durchgeführt wurde und stattgefunden hat.

Nach der Transkription des Baustelleninterviews durch Herrn Felix Ehmke wird mir dieses Transkript des Baustelleninterviews vor der Veröffentlichung der Masterarbeit nochmals übermittelt, um die inhaltliche Korrektheit der getätigten Aussagen überprüfen zu können. Anschließend, insofern keine Einwände vorhanden sind, darf eine anonyme Veröffentlichung des Baustelleninterviews erfolgen.

Ort, Datum

Unterschrift

7.5 Freigabebestätigung

Ich,, bestätige mit meiner nachstehenden Unterschrift, dass mir die Transkription des Baustelleninterviews vom von Herrn Felix Ehmke übermittelt wurde. Ich versichere hiermit, dass die darin enthaltenen Aussagen meinen persönlichen Antworten entsprechen. Daher darf Herr Felix Ehmke das Baustelleninterview für die Zwecke seiner Masterarbeit an der Universität Innsbruck verwenden.

Ort, Datum

Unterschrift

Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Magister-/Master-/Diplomarbeit/Dissertation eingereicht.

Innsbruck am 29.03.2024



Felix Ehmke, BSc